

Support de cours pour enseignants d'Architecture et de Génie Civil

Module 7B

Applications structurales des produits plats en acier inoxydable

L'acier inoxydable structural

Conception et calcul avec l'acier inoxydable

Barbara Rossi & Maarten Fortan
Département de Génie Civil,
KU Leuven, Belgique

A partir d'une précédente version rédigée par Nancy Baddoo
Steel Construction Institute, Ascot, GB

Plan

- Exemples d'applications structurales
- Caractéristiques mécaniques du matériau
- Calculs selon l'Eurocode 3
- Méthodes alternatives
- Flèches
- Informations complémentaires
- Ressources pour les ingénieurs

Partie 1

Exemples d'applications structurales



Gare de Gand-Saint-Pierre (Belgique)

Architecte : Wefirna

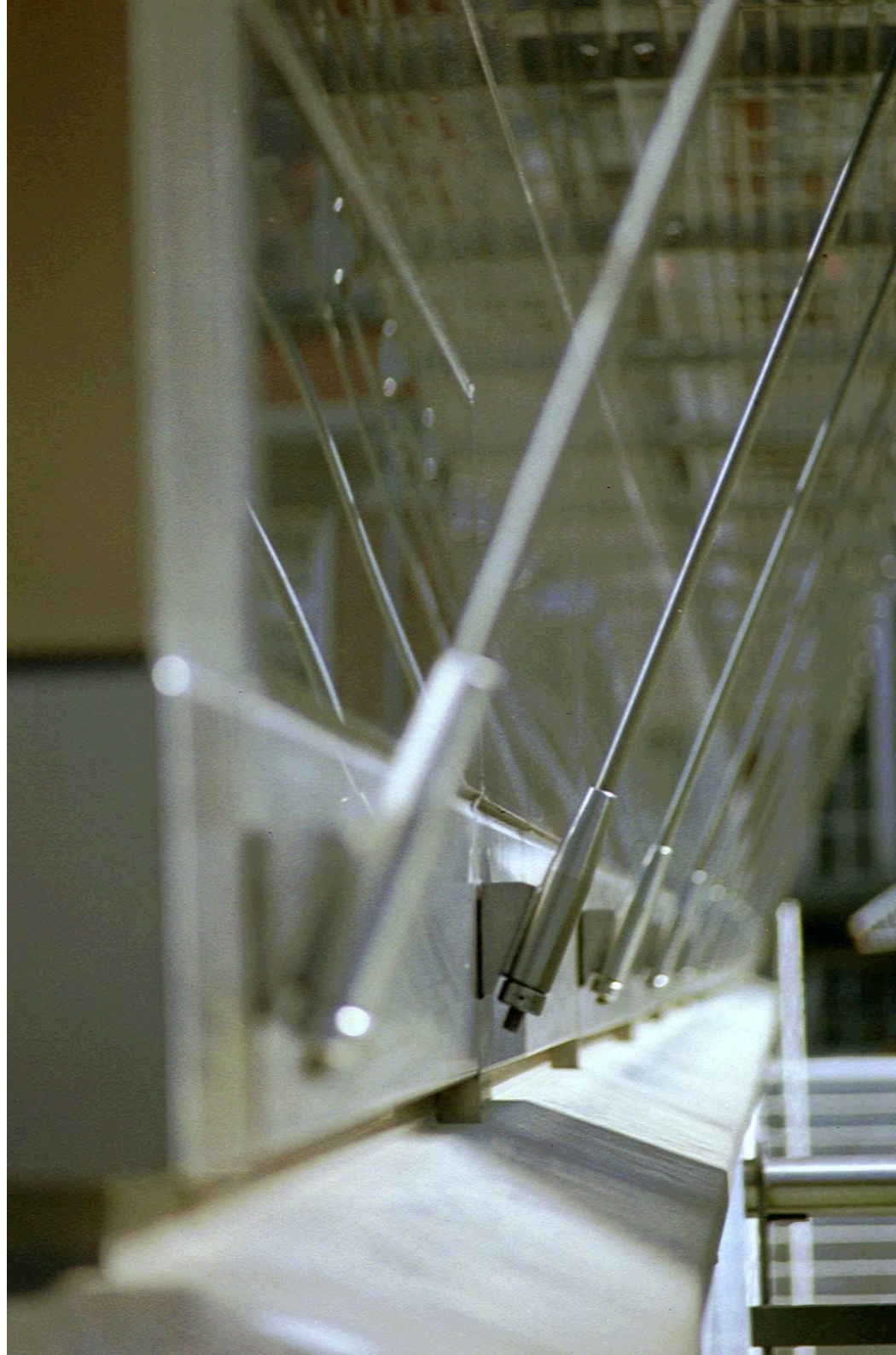
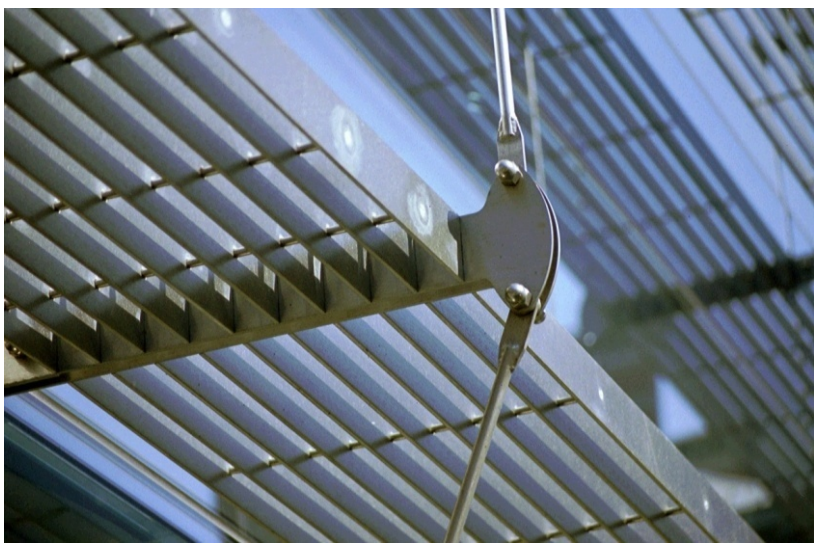
Bureau d'études : THV Van Laere-Braekel Aero



École royale militaire de Bruxelles (Belgique)

Architecte : AR.TE

Bureau d'études : Tractebel Development





La Grande Arche de La Défense, Paris (France)

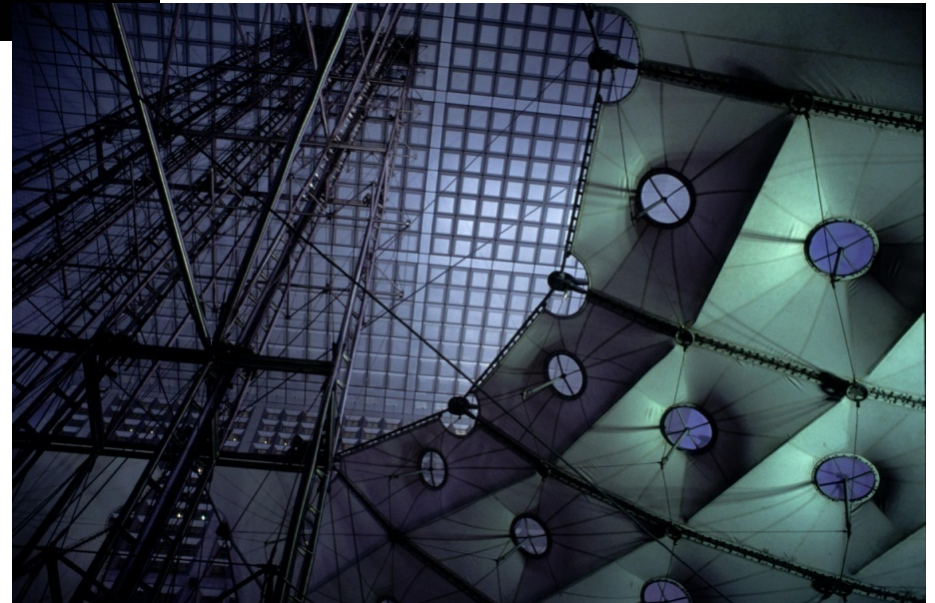
Architecte : Johan Otto von Spretkelsen

En acier inoxydable :

Le nuage (structure métallo-textile)

Bureau d'études :

Paul Andreu et François Deslaugiers, ADP



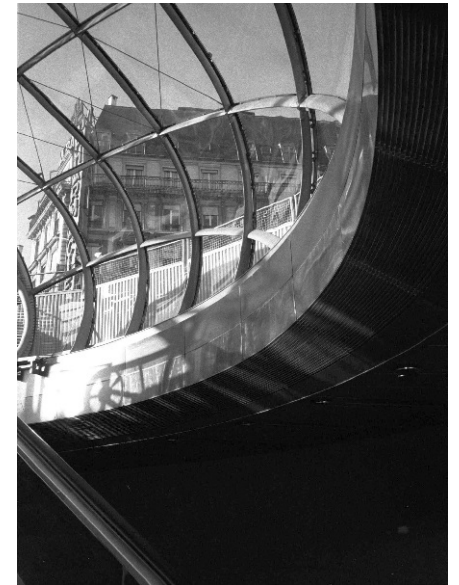


Villa Inox à Tuusula (Finlande)

Lentille du métro Saint-Lazare, Paris (France)

Architecte : Arte Charpentiers
& Associés

Bureau d'études : Mitsu
Edwards, RFR



Gare de Porto (Portugal)



Siège de Torno Internazionale S.P.A., Milan (Italie)

Architecte : Dante O. Benini & Partenaires

Acier inoxydable EN 1.4404



Photo : Toni Nicolino / Nicola Giacomini

**Portiques en acier
inoxydable dans une
centrale nucléaire**



Photo: Stainless Structurals LLC

Appuis de façade en acier inoxydable, Tampa (USA)



Photo : TriPyramid Structures, Inc.

« Thames Gateway Water Treatment Works », usine de traitement d'eau à Beckton, Londres (GB)

Poutrelles en I en acier inoxydable



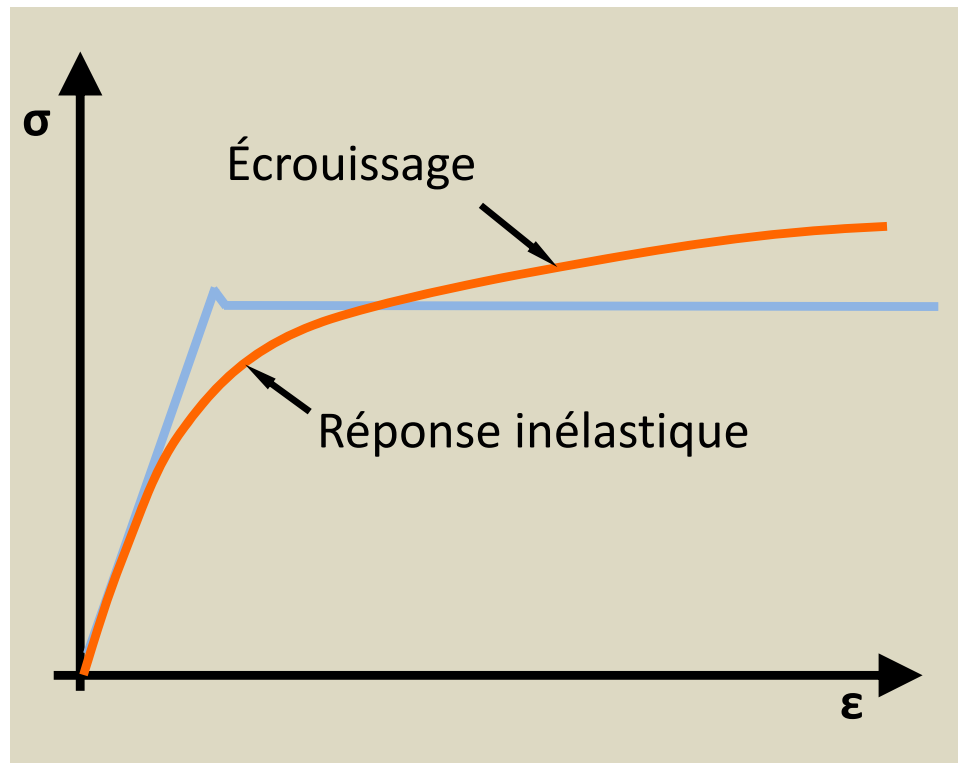
Photo : Interserve0

Partie 2

Caractéristiques mécaniques des matériaux

Caractéristiques contrainte-déformation : aciers au carbone / aciers inoxydables

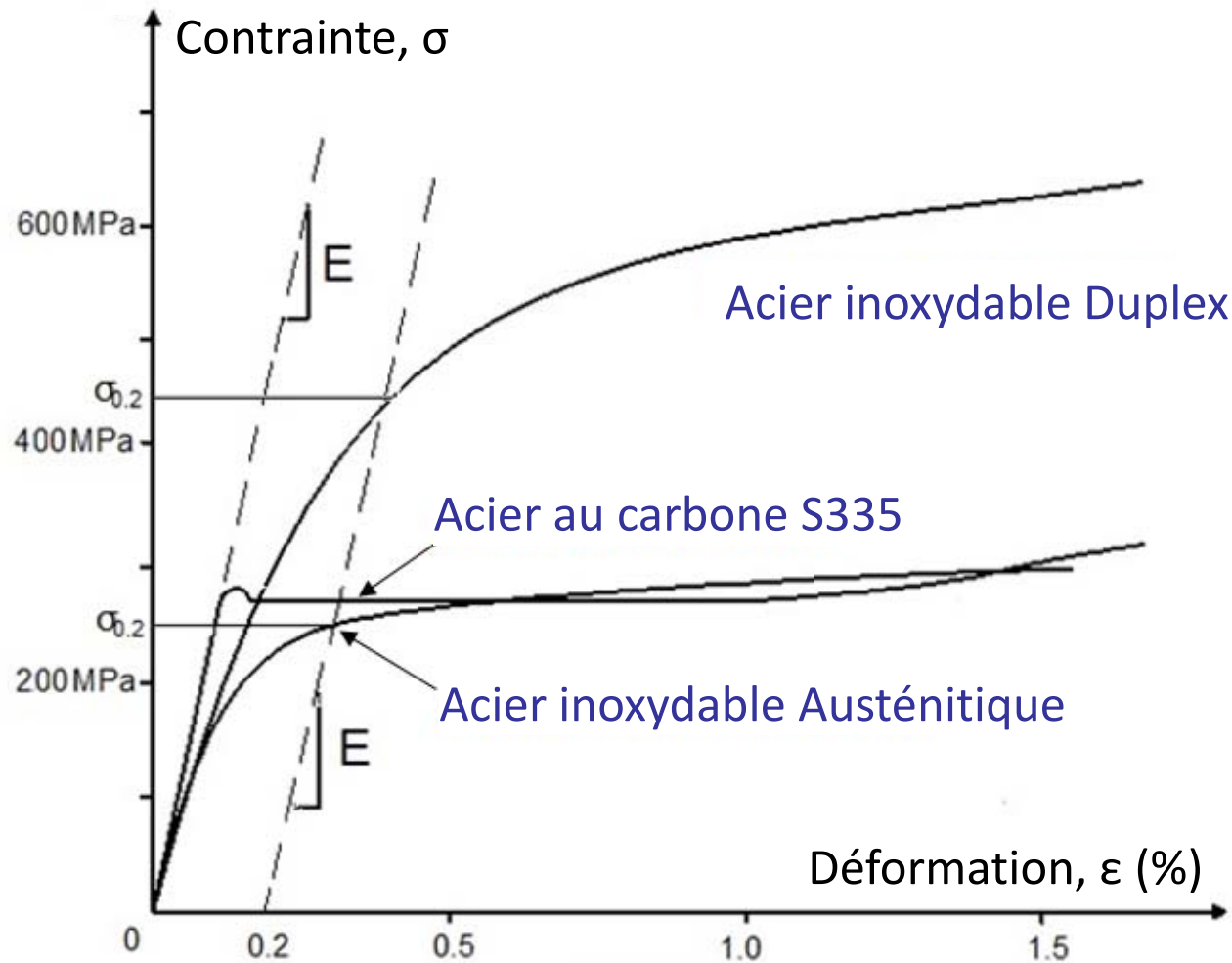
La loi de comportement σ - ϵ des aciers inoxydables est fondamentalement différente de celle des aciers au carbone



L'acier au carbone présente une limite d'élasticité très nette suivie d'un plateau plastique.

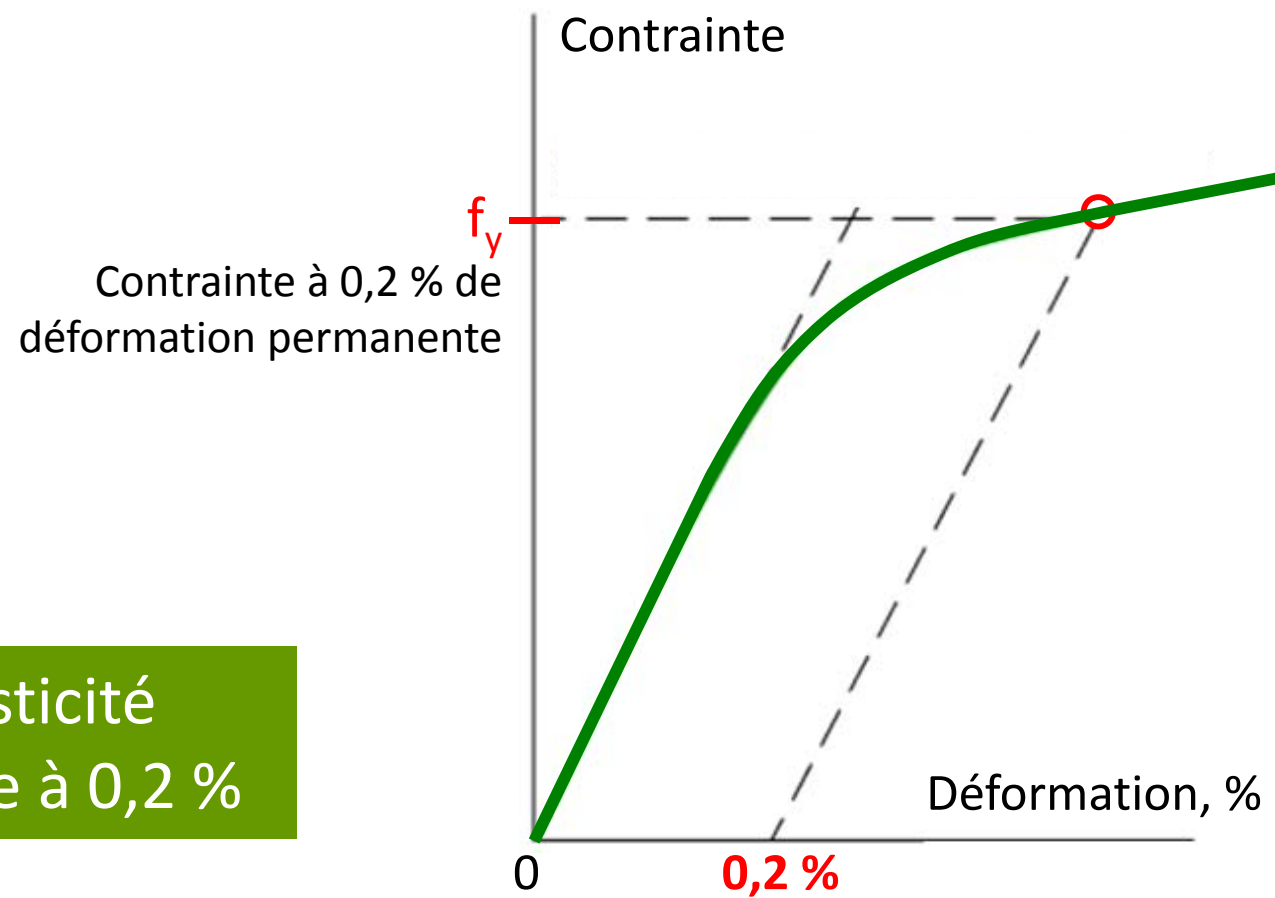
L'acier inoxydable présente un comportement plastique progressif avec un fort écrouissage.

Caractéristiques contrainte-déformation : petites déformations



La réponse contrainte-déformation dépend de la famille et de la nuance de l'acier

Quelle est la limite d'élasticité pour le calcul ?



f_y = limite d'élasticité
conventionnelle à 0,2 %

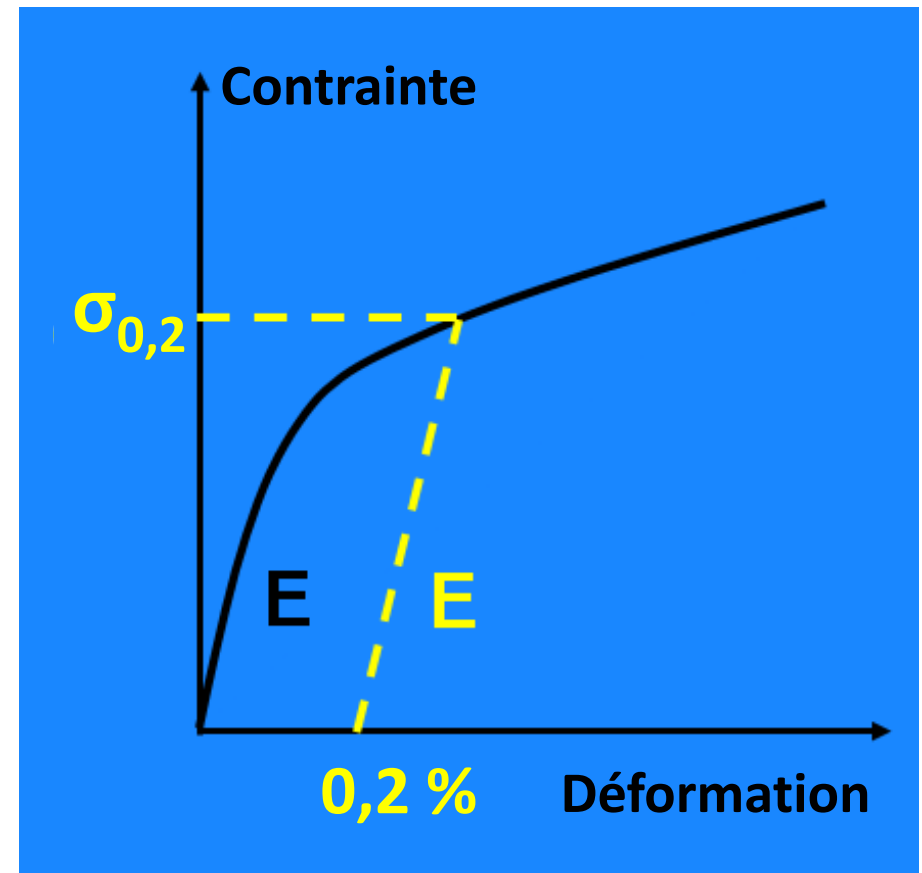
Résistance de calcul de l'acier inoxydable

Les valeurs minimales spécifiées des limites d'élasticité conventionnelles à 0,2 % sont données dans les EN 10088-4 et -5

Austénitiques : $f_y = 220$ à 350 MPa

Duplex : $f_y = 400$ à 480 MPa

Module de Young : $E = 200\ 000$ à $220\ 000$ MPa



Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable

Nuance	Limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % (MPa)	Résistance ultime (MPa)	Module de Young (GPa)	Déformation à rupture (%)
1.4301 (304)	210	520	200	45
1.4401 (316)	220	520	200	40

Écrouissage (lors de la production de l'acier ou du laminage à froid)

- Il entraîne une augmentation de la résistance mécanique du fait des déformations plastiques
- Il résulte du laminage à froid pendant les opérations de fabrication de l'acier dans l'aciérie ou de la déformation pendant la mise en forme

Lors de la fabrication des sections creuses rectangulaires, la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 % augmente d'environ 50 % dans les angles des sections du fait du formage à froid !

Applications structurales des produits plats en acier inoxydable

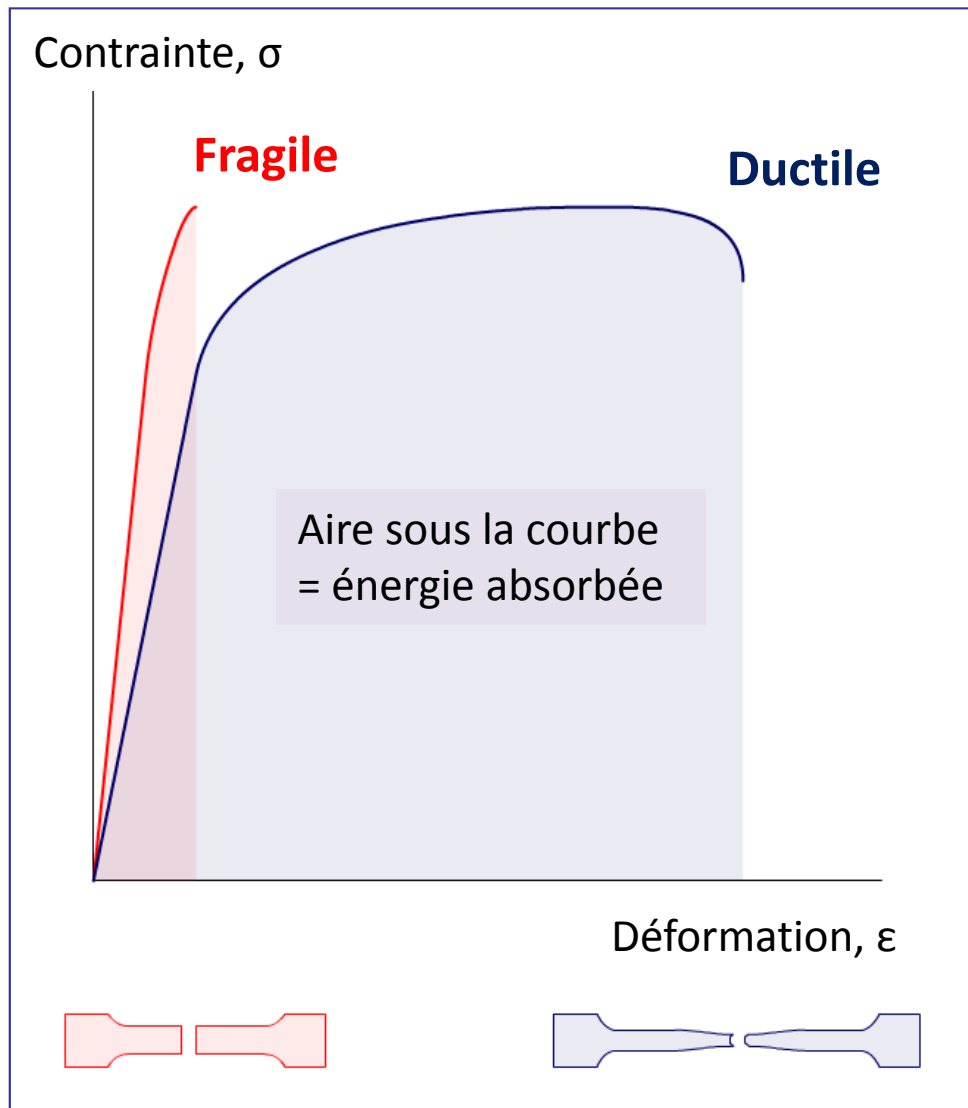
- 22



L'écrouissage – il n'est pas toujours utile

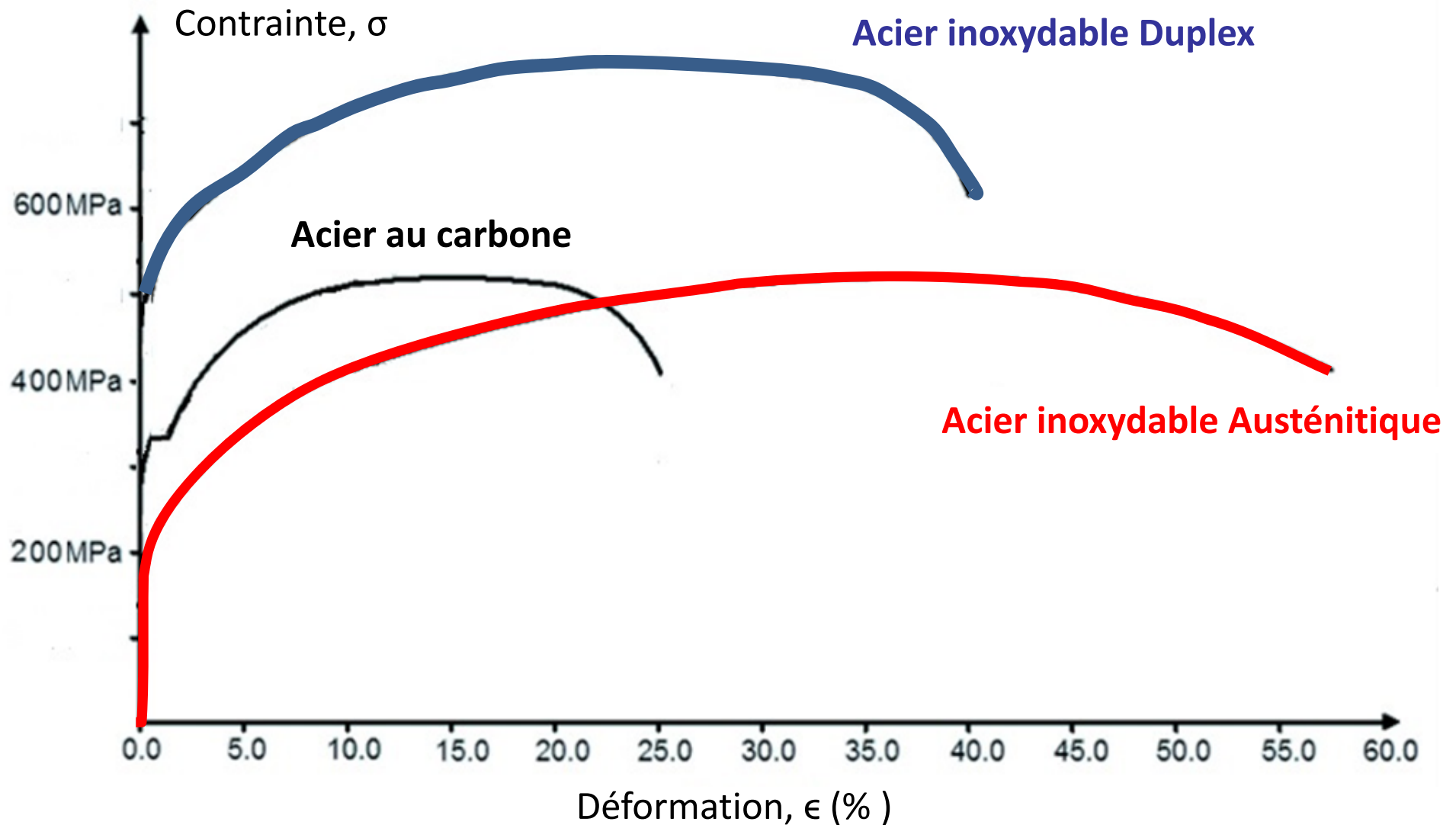
- Il exige des équipements de fabrication plus lourds et plus puissants
- Il nécessite des efforts plus importants
- Il réduit la ductilité (mais celle-ci est initialement élevée, particulièrement pour les austénitiques)
- Il peut entraîner des contraintes résiduelles indésirables

Ductilité et ténacité

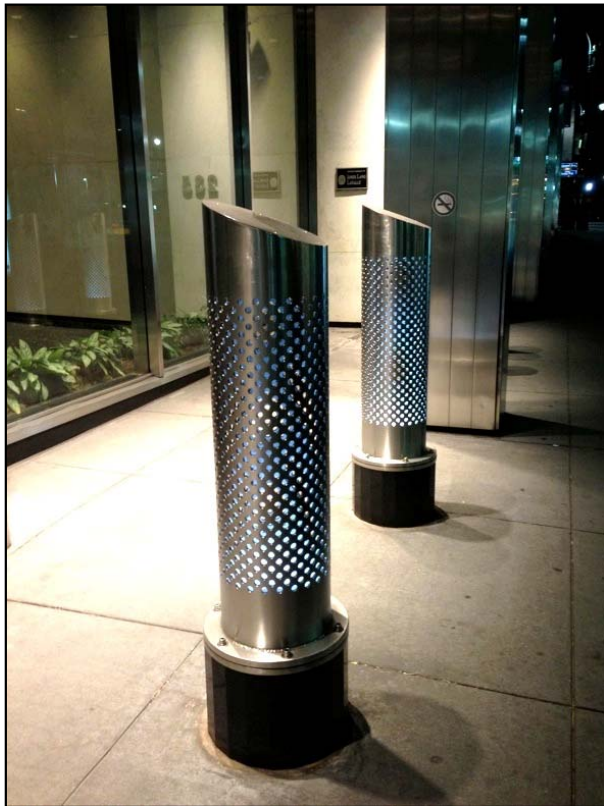


- **Ductilité** – capacité de s'allonger sans se rompre
- **Ténacité** – capacité d'absorber de l'énergie et de se déformer plastiquement sans fissurer

Caractéristiques contrainte-déformation : grandes déformations



Structures résistantes aux explosions et aux chocs



Bornes de sécurité



Panneaux trapézoïdaux résistant aux explosions.
Ils sont destinés à des superstructures de plates-
formes offshore

Caractéristiques contrainte-déformation

La non-linéarité... entraîne :

- des limites différentes pour les rapports largeur-épaisseur pour le voilement local
- des comportements différents au flambement pour les barres comprimées et fléchies
- des flèches plus grandes

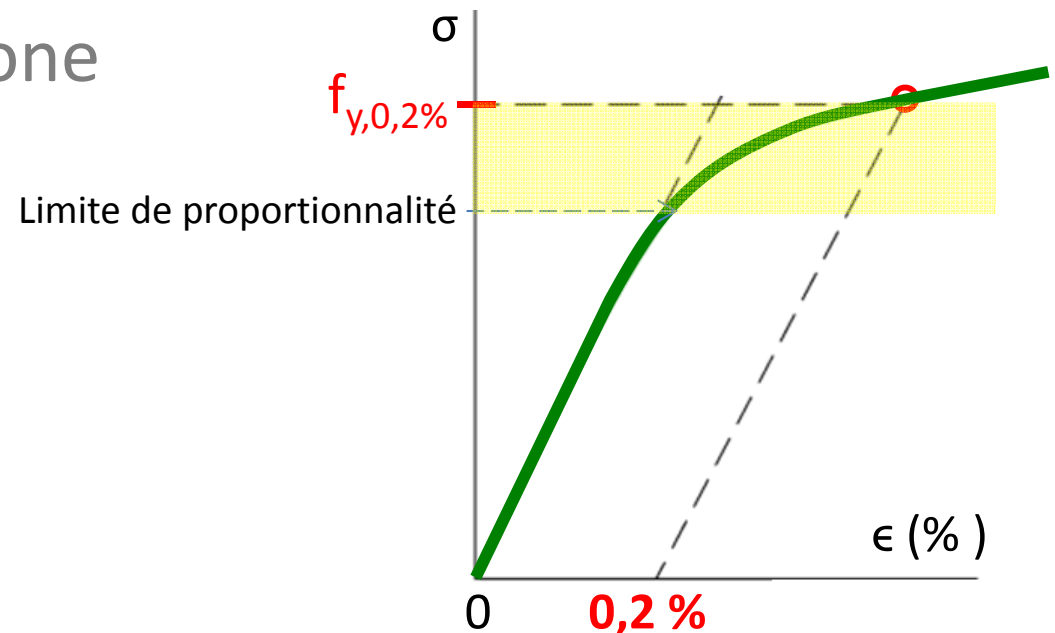
Impact sur la performance au flambement

- Pour les **faibles élancements** :
Les poteaux atteignent/dépassent la charge d'écrasement
→ les **bénéfices** de l'écrouissage sont très nets.
Les aciers inoxydables se comportent au moins aussi bien que les aciers au carbone
- Pour les **grands élancements** :
La résistance sous charges axiales reste faible. Les contraintes restent dans le domaine linéaire (élastique)
Les aciers inoxydables se comportent **de manière similaire** aux aciers au carbone, sous réserve que la géométrie et les contraintes résiduelles soient similaires

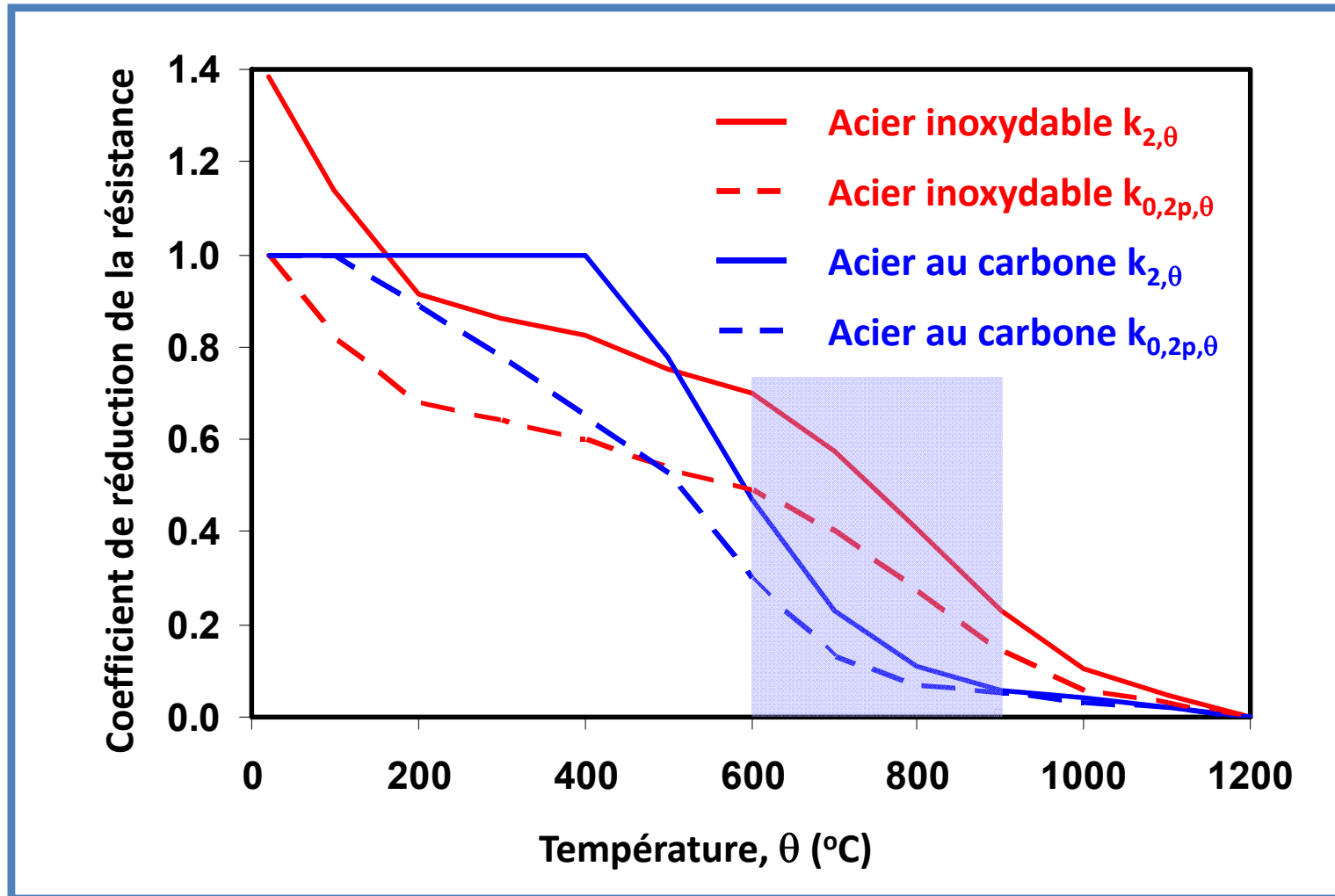
Impact sur la performance au flambement

- Pour les **élancements intermédiaires** :
La contrainte moyenne dans le poteau varie entre la limite de proportionnalité et la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 %.

Dans cette zone, les poteaux en acier inoxydable présentent **une résistance inférieure à celle** des poteaux en acier au carbone



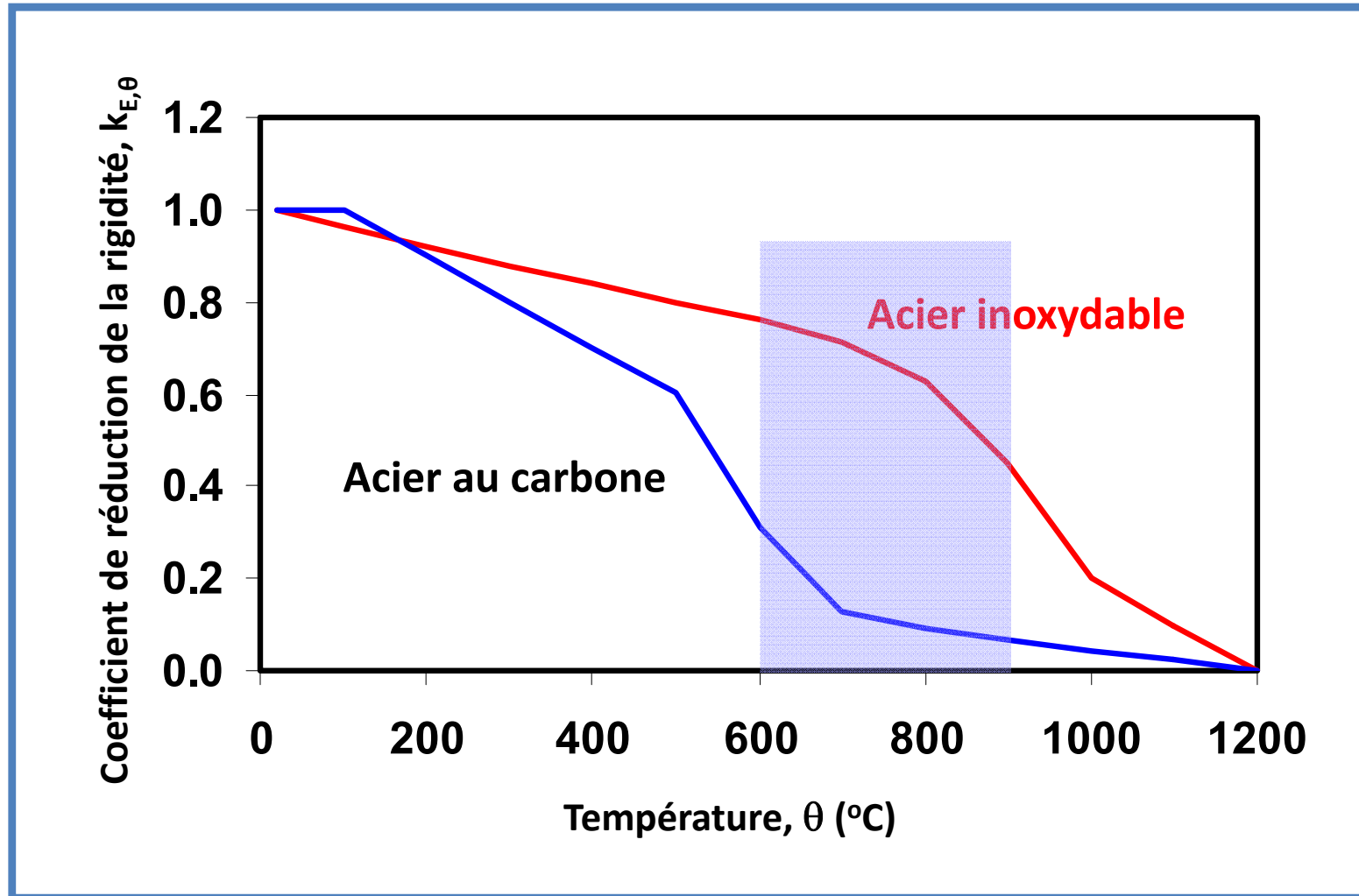
Comportement aux températures élevées



$k_{0,2p,\theta}$ = coefficient de réduction de la limite d'élasticité conventionnelle à 0,2 %

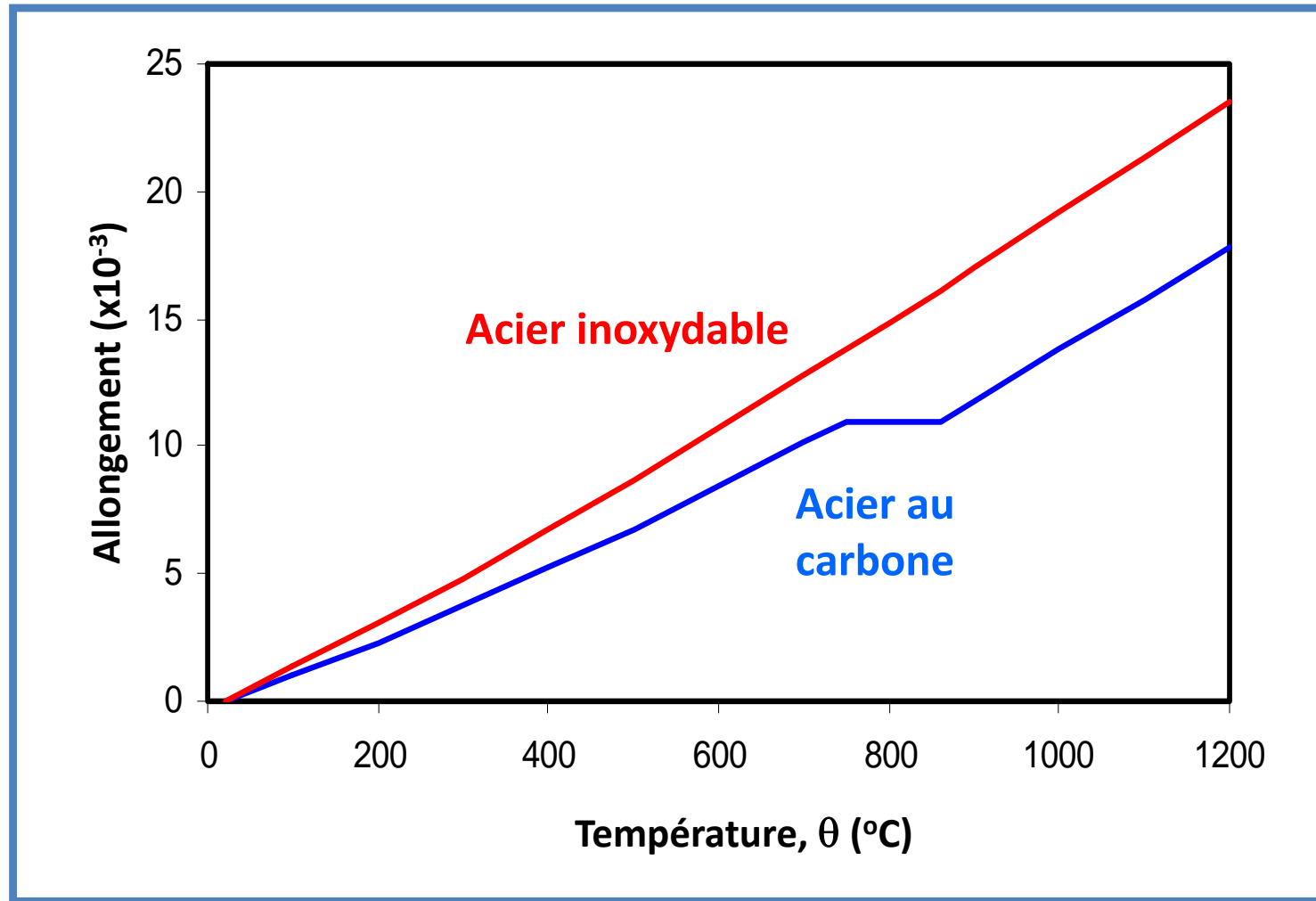
$k_{2,\theta}$ = coefficient de réduction pour une déformation totale de 2 %

Comportement aux températures élevées



Coefficients de réduction de la rigidité

Comportement aux températures élevées



Dilatation thermique

Partie 3

Calculs selon l'Eurocode 3

Calculs d'éléments en acier inoxydable

- Les approches sont les mêmes que pour l'acier au carbone
- Pour les barres tendues et les poutres empêchées de déverser, les règles utilisées sont les mêmes que pour l'acier au carbone
- Quelques différences existent dans les limites de classification des sections, le voilement local et les courbes de flambement en raison :
 - de la non-linéarité de la courbe contrainte-déformation
 - des caractéristiques d'écrouissage
 - des niveaux de contraintes résiduelles différents

Normes de calcul internationales

Quelles sont les normes de calcul disponibles pour les structures en acier inoxydable ?



Yacht Club d'Hamilton Island, Australie

EN 1990

Sécurité des structures, aptitude au service et durabilité

EN 1991

Action sur les structures

EN 1992

EN 1994

EN 1995

EN 1996

EN 1999

Calculs et dimensionnements

EN 1997

Calculs géotechniques

EN 1998

Calculs sismiques

Liens entre les Eurocodes

Les Eurocodes représentent une suite cohérente de normes de calculs des structures. Ils couvrent tous les matériaux de construction courants

Eurocode 3 : Partie 1 (EN 1993-1)

EN 1993-1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

EN 1993-1-2 : Calcul du comportement au feu

EN 1993-1-3 : Profilés et plaques formés à froid

EN 1993-1-4 : Aciers inoxydables

EN 1993-1-5 : Plaques planes

EN 1993-1-6 : Résistance et stabilité des structures en coque

EN 1993-1-7 : Structures en plaques chargées hors de leur plan

EN 1993-1-8 : Calcul des assemblages

EN 1993-1-9 : Fatigue

EN 1993-1-10 : Choix des qualités d'acier

EN 1993-1-11 : Calcul des structures à câbles ou éléments tendus

EN 1993-1-12 : Règles additionnelles pour l'utilisation de l'EN 1993 jusqu'à la nuance d'acier S 700

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

FA114142 ISSN 0335-3931
norme européenne **NF EN 1993-1-4**
norme française **Février 2007**
Indice de classement : P 22-314
ICS : 91.080.10

Eurocode 3
Calcul des structures en acier
Partie 1-4 : Règles générales —
Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-4: General rules —
Supplementary rules for stainless steels
D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —
Teil 1-4: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln
zur Anwendung von nichtrostenden Stählen

Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 20 janvier 2007 pour prendre effet le 20 février 2007.

Est destinée à remplacer partiellement la norme expérimentale XP ENV 1993-1-4, d'août 2000, qui reste en vigueur jusqu'en mars 2010.

Correspondance La Norme européenne EN 1993-1-4:2006 a le statut d'une norme française.

Analyse La présente partie de l'Eurocode 3 fixe des dispositions complémentaires pour le calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil qui étendent et modifient l'application des EN 1993-1-1, EN 1993-1-3, EN 1993-1-5 et EN 1993-1-8 aux aciers inoxydables austénitiques, austéno-ferritiques. Le présent document ne comprend pas de document d'application national mais doit être complété par une Annexe nationale qui définit les modalités de son application.

Descripteurs Thésaurus International Technique : bâtiment, génie civil, construction métallique, acier de construction, acier inoxydable, calcul, règle de calcul, conception, règle de construction, résistance des matériaux.

Modifications Par rapport au document destiné à être remplacé, adoption de la norme européenne.

Corrections

Édité et diffusé par l'Association Française de Normalisation (AFNOR) — 11, rue Francis de Pressensé — 93571 La Plaine Saint-Denis Cedex
Tél. : + 33 (0)1 41 62 80 00 — Fax : + 33 (0)1 49 17 90 00 — www.afnor.org

© AFNOR 2007

AFNOR 2007

1^{er} tirage 2007-02-F

Calcul des structures en acier.
Règles supplémentaires pour les
aciers inoxydables (2007)

- Modifie et complète les règles données dans d'autres parties de l'Eurocode 3 pour l'acier au carbone lorsque nécessaire
- S'applique aux bâtiment, aux ponts, aux réservoirs, etc.

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

Types de barres

- Laminées à chaud et soudées
- Formées à froid
- Barres

Nombre de nuances

	EC3-1-4	Future version
Ferritique	3	3
Austénitique	16	16
Duplex	2	6

Domaines d'application

- Barres et assemblages
- Feu (*en référence à l'EN 1993-1-2*)
- Fatigue (*en référence à l'EN 1993-1-9*)

Autres normes de calcul

- **Japon** – Deux normes : une pour les éléments en acier inoxydable formés à froid et une pour les éléments soudés
- **Afrique du Sud, Australie, Nouvelle Zélande** – Normes pour les éléments en acier inoxydable formés à froid
- **Chine** – Norme en cours de rédaction
- **USA** – Spécifications de l'ASCE pour les éléments formés à froid et Guide de calcul de l'AISC pour les éléments de structure en acier inoxydable laminés à chaud et soudés

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

Partie 1.4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables

Les prochaines diapos présentent un résumé des règles de calcul issues de l'EN 1993-1-4 pour l'acier inoxydable. Elles mettent également en évidence les principales différences qui existent avec les règles équivalentes pour l'acier au carbone.



Poteaux résistant aux explosions pour l'auvent de l'entrée du « Seven World Trade Centre », New York

Expressions pour la classification des sections et le voilement local selon l'EN 1993-1-4

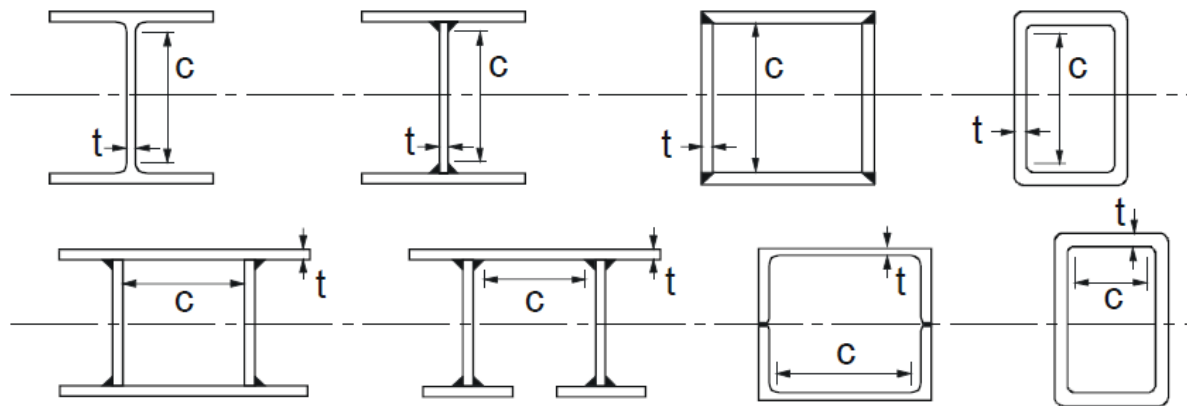
- Limites des rapports largeur-épaisseur plus basses que pour l'acier au carbone
- Expressions légèrement différentes pour le calcul des largeurs efficaces des parois comprimées

Cependant...

La prochaine version de l'EN 1993-1-4 contiendra des expressions moins conservatives pour les limites de classification et pour les largeurs efficaces.

Classification des sections & expressions pour le voilement selon l'EN 1993-1-4

■ Parois comprimées internes

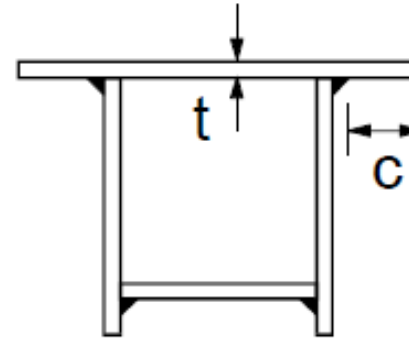
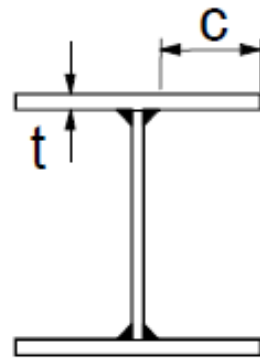


$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}}$$

Classe	EC3-1-1 : Acier au carbone		EC3-1-4 : Acier inoxydable		EC3-1-4 : Future version	
	Flexion	Compression	Flexion	Compression	Flexion	Compression
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	$c/t \leq 56\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	$c/t \leq 76\varepsilon$	$c/t \leq 35\varepsilon$
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 90\varepsilon$	$c/t \leq 37\varepsilon$

Classification des sections & expressions pour le voilement selon l'EN 1993-1-4

■ Parois comprimées en console



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}}$$

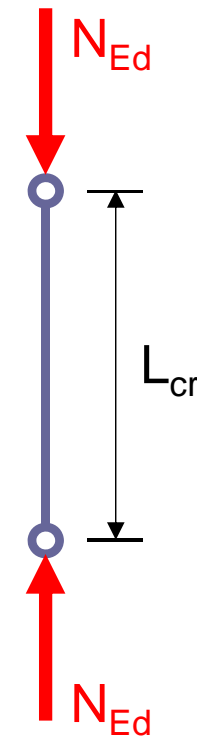
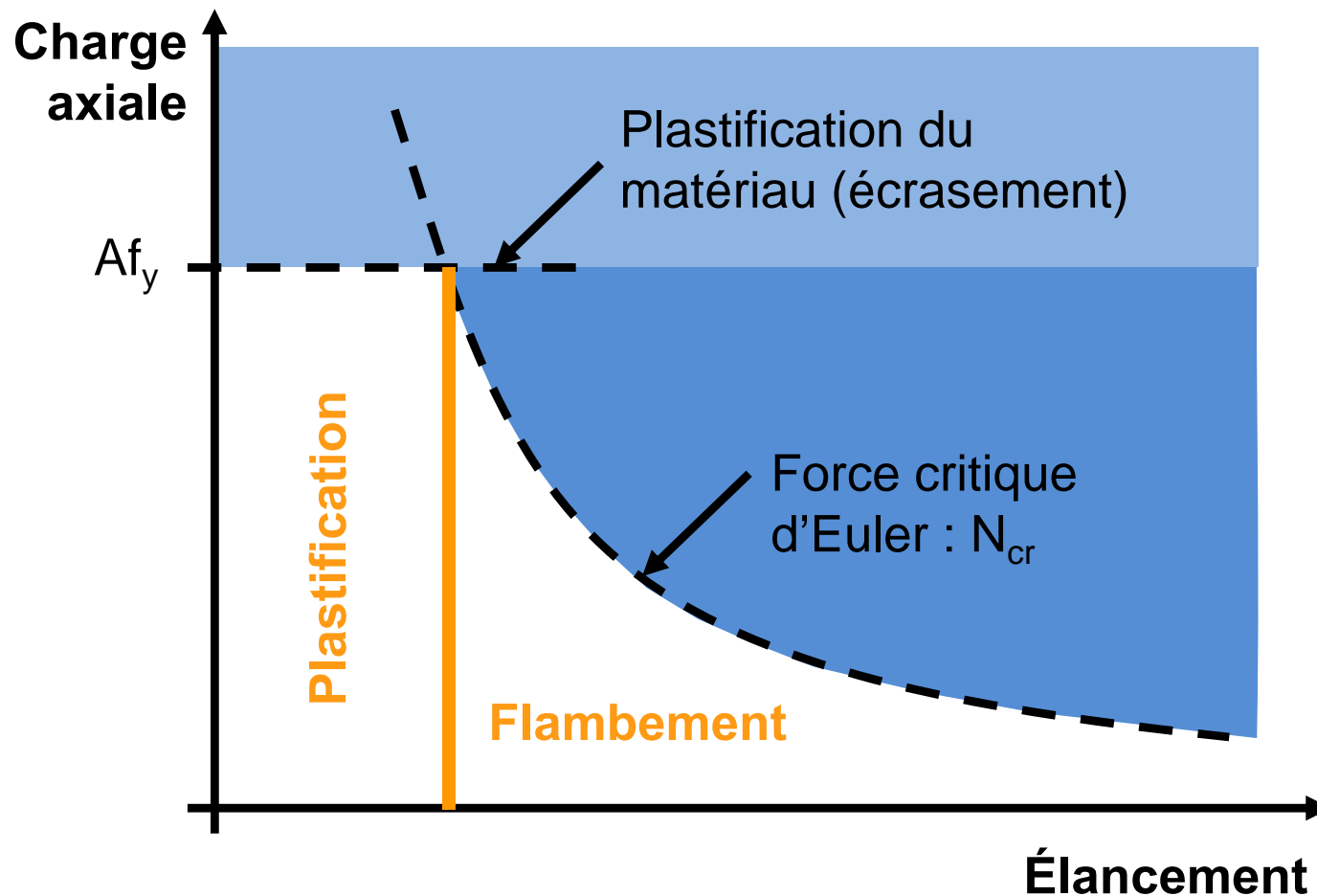
	EC3-1-1 : Acier au carbone	EC3-1-4 : Acier inoxydable		EC3-1-4 : Future version
Classe	Compression	Compression Soudé	Compression Formé à froid	Compression
1	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9\varepsilon$
2	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq 10\varepsilon$
3	$c/t \leq 14\varepsilon$	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 14\varepsilon$

Calcul de poutres et de poteaux

- En général, l'approche est la même que pour l'acier au carbone
- Mais les courbes de flambement sont différentes, pour le flambement et pour le déversement
- et il faut s'assurer d'utiliser la valeur correcte de f_y selon la nuance d'acier (les valeurs minimales spécifiées sont données dans l'EN 10088-4 et -5)

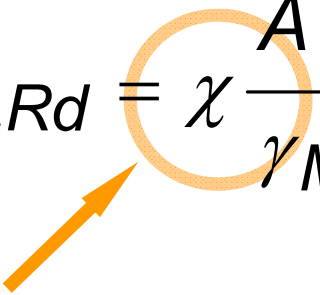
Flambement d'un poteau « parfait »

2 limites : plastification et flambement :



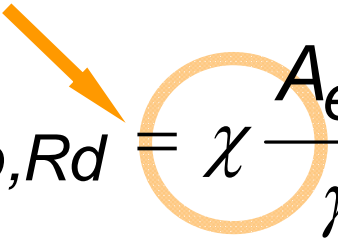
Flambement d'un poteau

Résistance au flambement $N_{b,Rd}$:

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A f_y}{\gamma_{M1}}$$


Pour les Classes 1, 2 et 3

Coefficient de réduction

$$N_{b,Rd} = \chi \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}$$


Pour les Classes 4 (symétriques)

Flambement d'un poteau

Élancement réduit $\bar{\lambda}$:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$$

Pour les sections transversales de Classes 1, 2 et 3

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}$$

Pour les sections transversales de Classe 4

N_{cr} est la force critique de flambement élastique pour le mode de flambement approprié basé sur les propriétés de la section transversale brute

Flambement d'un poteau

Coefficient de réduction χ :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi \leq 1,0$$

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

Facteur d'imperfection

Longueur du plateau

Flambement d'un poteau

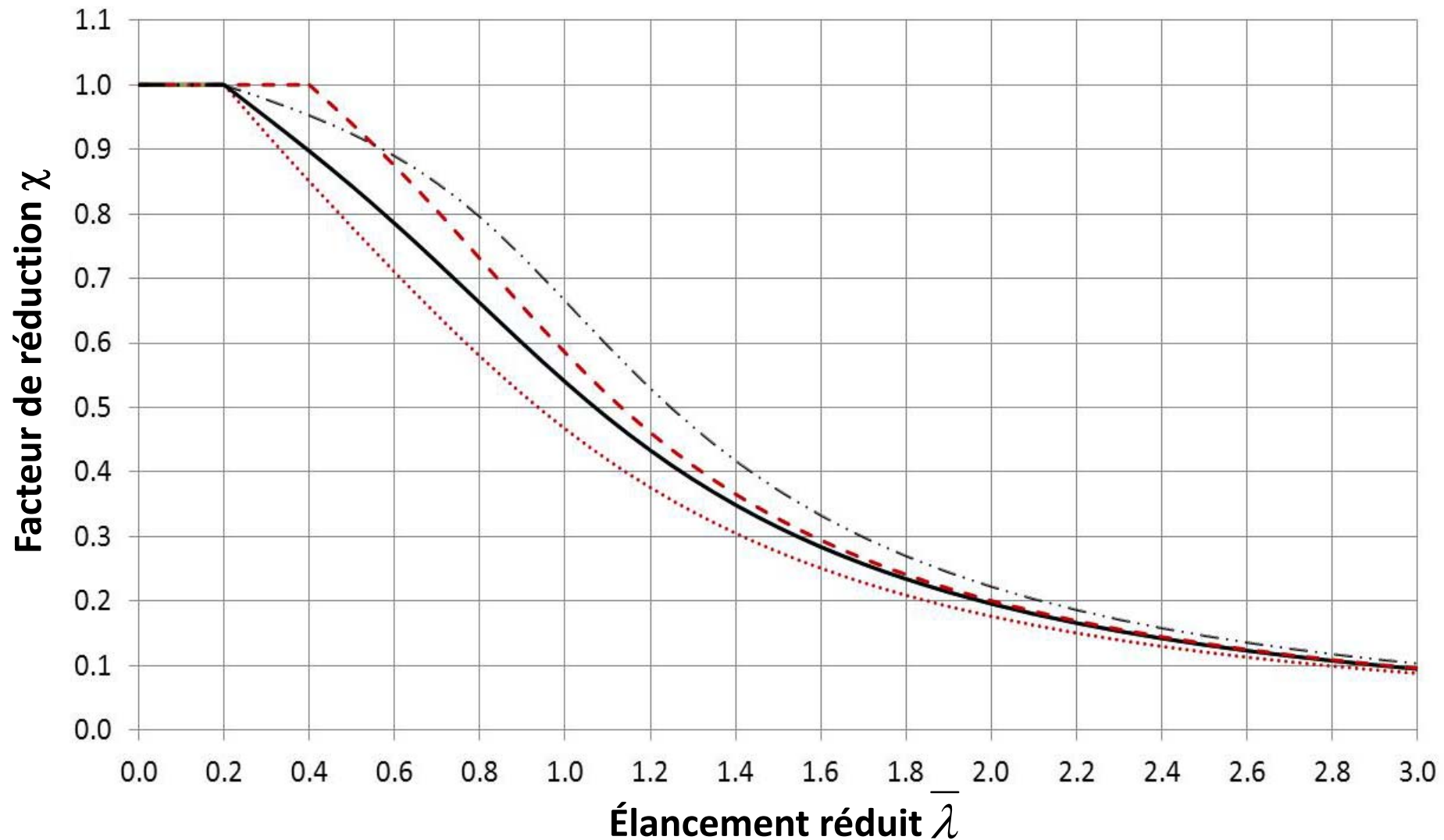
- Le choix de la courbe de flambement dépend de la section transversale, du mode de fabrication et de l'axe de flambement

Tableau 5.3 — Valeurs de α et $\bar{\lambda}_0$ pour le flambement par flexion, torsion et flexion-torsion

Mode de flambement	Type d'élément	α	$\bar{\lambda}_0$
Flexion	Profils ouverts formés à froid	0,49	0,40
	Profils creux (soudés et non soudés)	0,49	0,40
	Profils ouverts soudés (axe principal)	0,49	0,20
	Profils ouverts soudés (axe secondaire)	0,76	0,20
Torsion et flexion-torsion	Tous les éléments	0,34	0,20

Extrait de l'EN 1993-1-4

Courbes de flambement de l'Eurocode 3

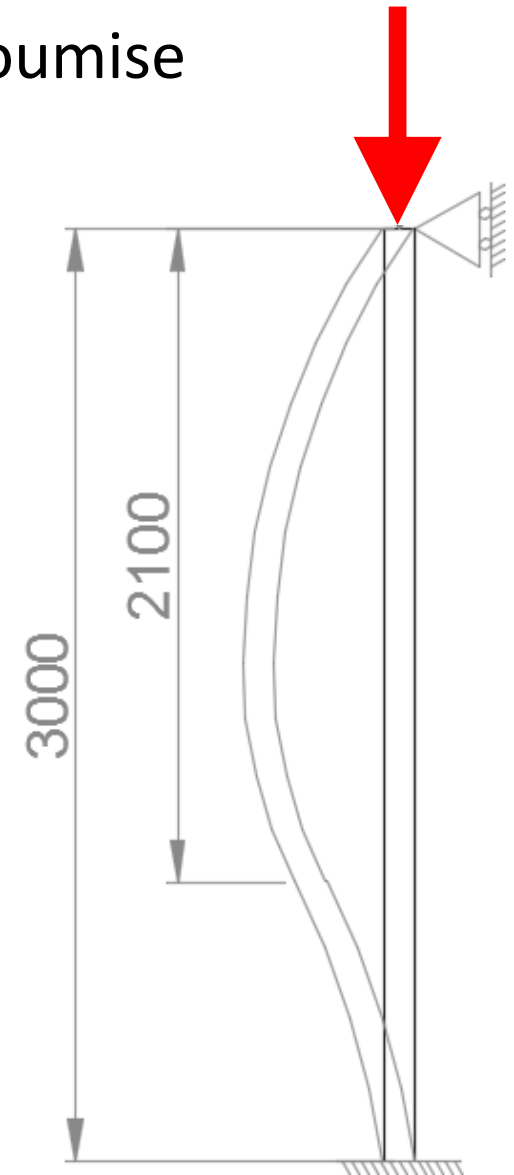
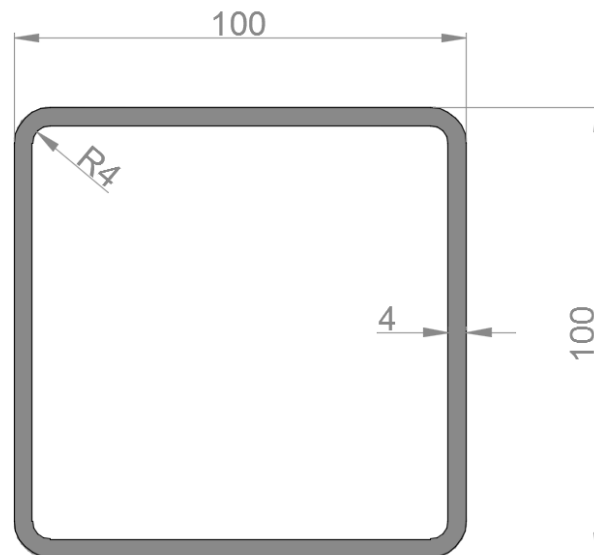


- - - Acier inoxydable : sections creuses (soudées et non soudées), U formés à froid
- Acier inoxydable : sections en I soudées
- Acier au carbone : sections en I soudées, sections creuses formées à froid, U formés à froid
- . . - Acier au carbone : sections creuses finies à chaud

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

- Section creuse rectangulaire formée à froid soumise à une compression centrée

	Acier au carbone	Acier inoxydable austénitique
Matériau	S235	EN 1.4301
f_y [MPa]	235	230
E [MPa]	210 000	200 000



Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S235

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Toutes les parois internes

$$c/t = 21 < 33 = 33\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

EC 3-1-4 : Austénitique

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}} = 0,99$$

Toutes les parois internes

$$c/t = 21 < 25,35 = 25,7\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex
$A \text{ [mm}^2\text{]}$	1495	1495
$f_y \text{ [MPa]}$	235	230
$\gamma_{M0} [-]$	1	1,1
$N_{c,Rd} \text{ [kN]}$	351	313
$L_{cr} \text{ [mm]}$	2100	2100
$\lambda_1 [-]$	93,9	92,6
$\bar{\lambda} [-]$	0,575	0,583
$\alpha [-]$	0,49	0,49
$\bar{\lambda}_0 [-]$	0,2	0,4
$\phi [-]$	0,76	0,71
$\chi [-]$	0,80	0,89
$\gamma_{M1} [-]$	1	1,1
$N_{b,Rd} \text{ [kN]}$	281	277

Exemple de flambement par flexion au sens de l'Eurocode 3

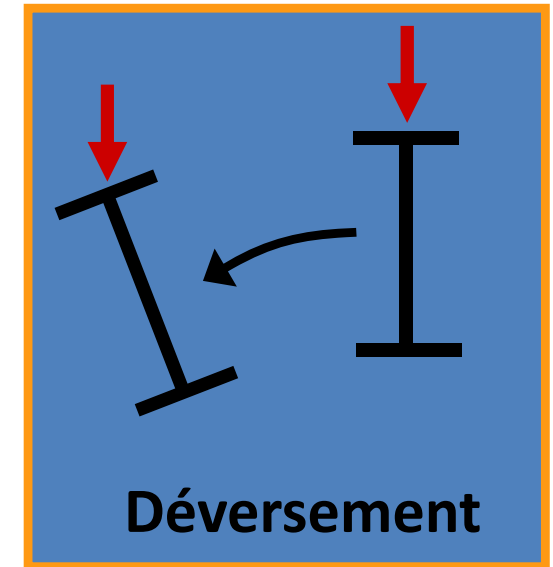
■ Comparaison

	EC 3-1-1 : S235	EC 3-1-4 : Austénitique
f_y [MPa]	235	230
γ_{M0}	1,0	1,1
γ_{M1}	1,0	1,1
Résistance en section $M_{c,Rd}$	351	313
Résistance au déversement $M_{b,Rd}$	281	277

- Dans cet exemple, les aciers au carbone et les aciers inoxydables possèdent des résistances au flambement par flexion très proches

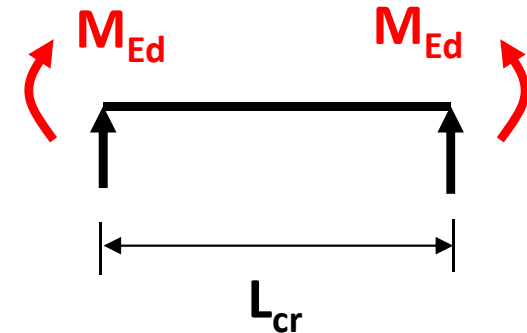
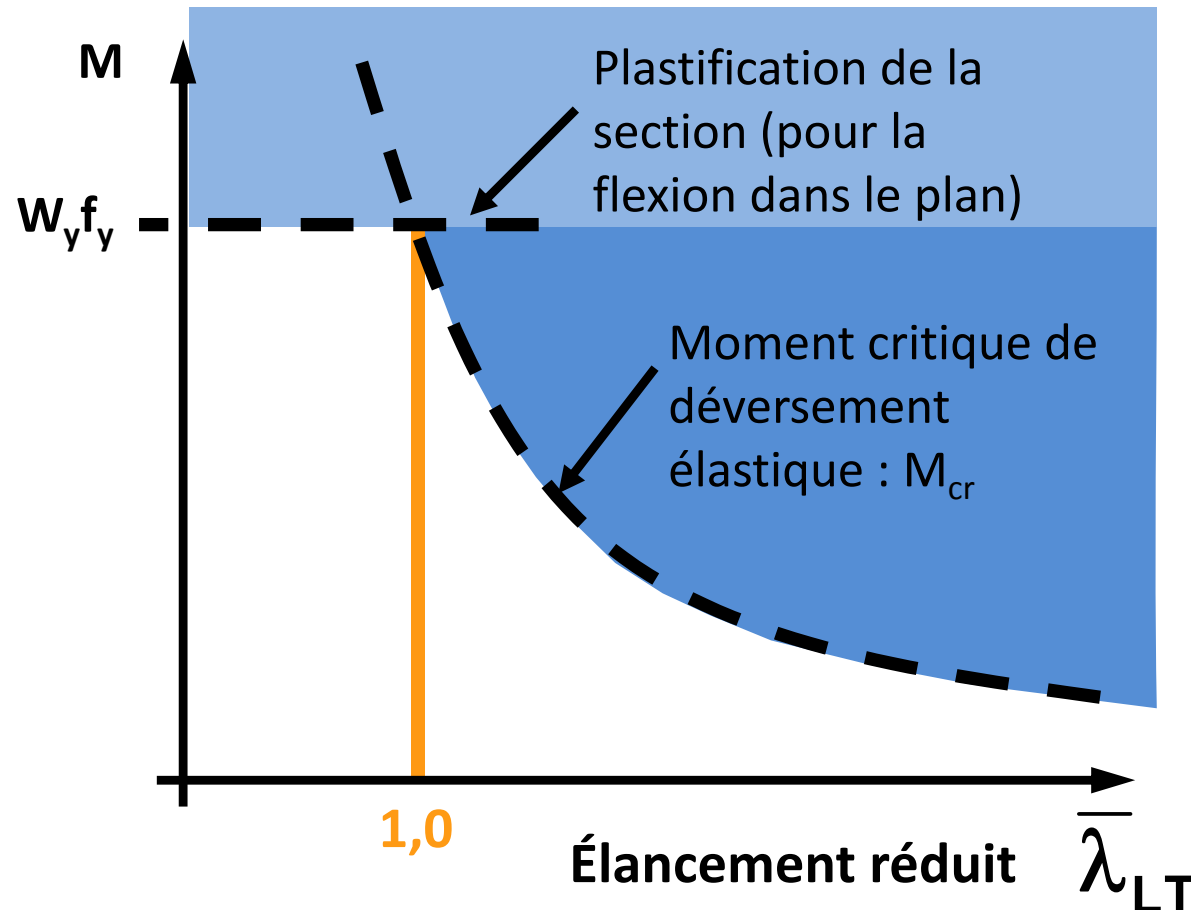
Déversement

- Il peut être évité :
 - si la flexion s'exerce autour de l'axe faible
 - En utilisant des sections creuses (rectangulaires, circulaires ou carrées) ou encore des barres rondes ou carrées
 - si la poutre est maintenue au déversement
 - ou si : $\bar{\lambda}_{LT} < 0,4$



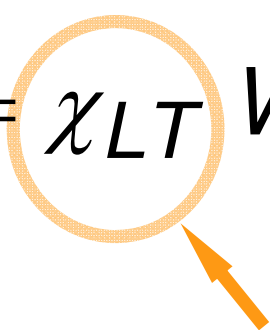
Déversement

- L'approche pour le calcul des poutres au déversement est analogue à celui des poteaux vis-à-vis du flambement.



Déversement

- Le moment de résistance au déversement $M_{b,Rd}$ d'une poutre (ou d'un tronçon de poutre) non maintenue latéralement doit être pris égal à :

$$M_{b.Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$


Facteur de réduction pour le déversement

Déversement

- Les expressions de calcul des courbes de déversement sont les suivantes :

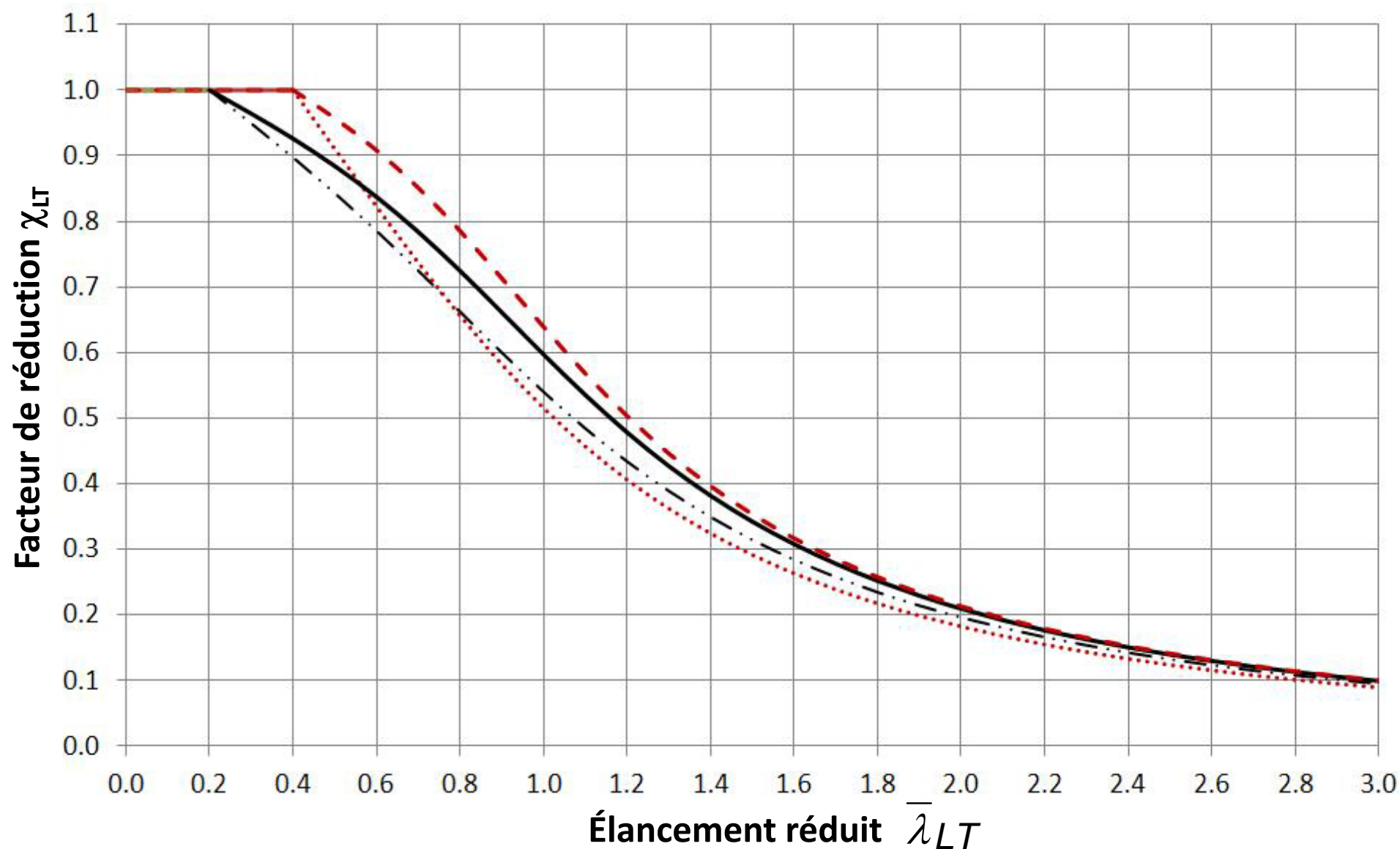
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Facteur d'imperfection

Longueur du plateau

Eurocode 3 : courbes de déversement



— · · Acier au carbone : sections en I soudées
 — Acier au carbone : U formés à froid

····· Acier inoxydable : sections en I soudées
 - - - Acier inoxydable : U formés à froid

Élancement réduit

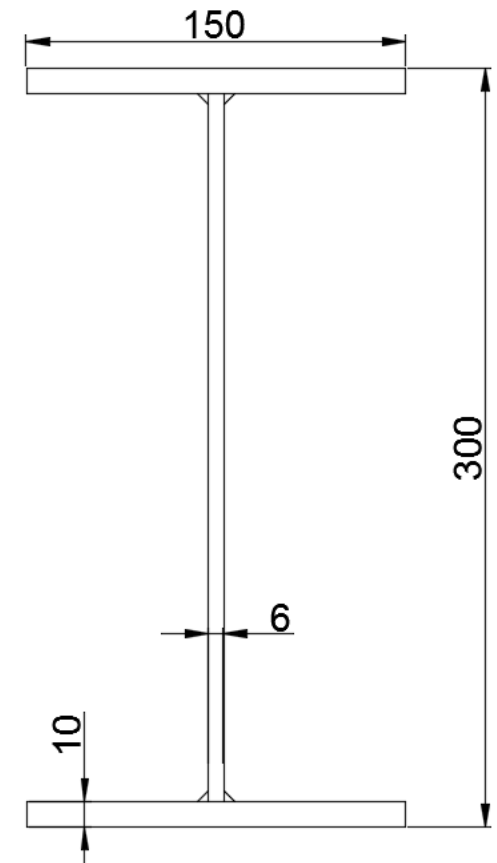
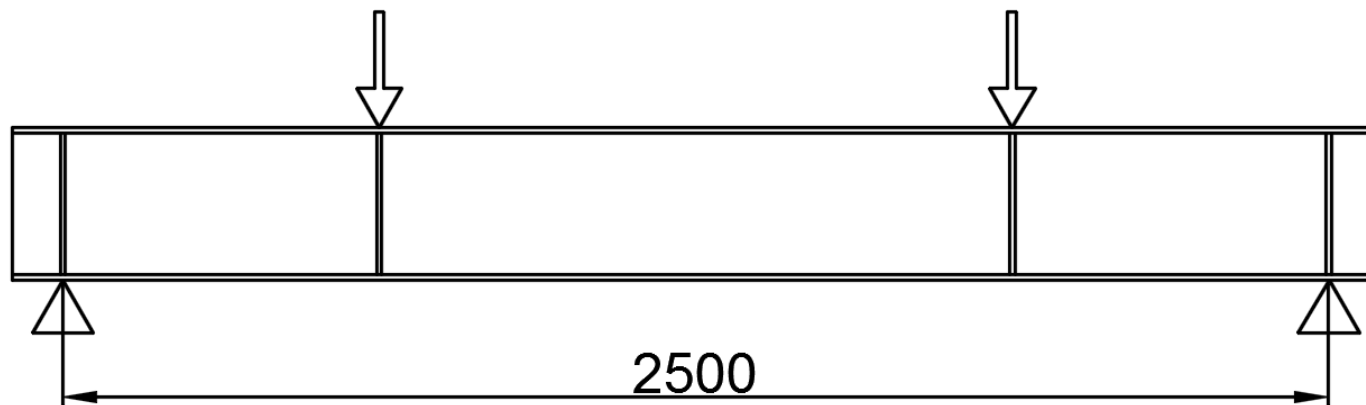
- Élancement réduit pour le déversement :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

- Les courbes de déversement sont les mêmes que pour la compression (sans la courbe a_0)
- W_y dépend de la classification de la section
- M_{cr} est le moment critique de déversement élastique

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

- Poutre en I fléchie



	Acier au carbone	Acier inoxydable Duplex
Matériau	S355	EN 1.4162
f_y [MPa]	355	450
E [MPa]	210000	200000

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S355

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,81$$

Semelle

$$c/t = 6,78 < 7,3 = 9\varepsilon$$

Classe 1

Ame

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 1

Section transversale : Classe 1

EC 3-1-4 : Duplex

Classification

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000}} = 0,71$$

Semelle

$$c/t = 6,78 < 7,76 = 11\varepsilon$$

Classe 1

Ame

$$c/t = 45,3 < 58,3 = 72\varepsilon$$

Classe 3

Section transversale : Classe 3

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

EC 3-1-1 : S355

- Moment ultime

- Classe 1

$$M_{C,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 196 \text{ kN.m}$$

EC 3-1-4 : Duplex

- Moment ultime

- Classe 3

$$M_{C,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 202 \text{ kN.m}$$

Future version de l'EC 3-1-4

- Limites de classification : proches de celle de l'acier au carbone

- Section transversale de classe 2

$$M_{C,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = 226 \text{ kN.m}$$

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

Moment critique de déversement élastique :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_T}{\pi^2 E I_z}} + (C_2 z_g)^2 - C_2 z_g \right\}$$

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex
C_1 [-]	1,04	1,04
C_2 [-]	0,42	0,42
k_z [-]	1	1
k_w [-]	1	1
z_g [mm]	160	160
I_z [mm ⁴]	$5,6 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$
I_T [mm ⁴]	$1,2 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
I_w [mm ⁶]	$1,2 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{11}$
E [MPa]	210000	200000
G [MPa]	81000	77000
M_{cr} [kNm]	215	205

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

Résistance au déversement :

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex	EC 3-1-4 : Future version
W_y [mm ³]	5,5.10⁵	4,9.10⁵	5,5.10⁵
f_y [N/mm ²]	355	450	450
M_{cr} [kNm]	215	205	205
$\bar{\lambda}_{LT}$ [-]	0,96	1,04	1,10
α_{LT} [-]	0,49	0,76	0,76
$\bar{\lambda}_{LT,0}$ [-]	0,2	0,4	0,4
ϕ_{LT} [-]	1,14	1,29	1,37
χ_{LT} [-]	0,57	0,49	0,46
γ_{M1} [-]	1,0	1,1	1,1
$M_{b,Rd}$ [kNm]	111	99	103

Exemple de déversement au sens de l'Eurocode 3

■ Comparaison

	EC 3-1-1 : S355	EC 3-1-4 : Duplex	EC 3-1-4 : Future version
f_y [MPa]	355	450	450
γ_{M0}	1,0	1,1	1,1
γ_{M1}	1,0	1,1	1,1
Résistance en section $M_{c,Rd}$	196	202	226
Résistance au déversement $M_{b,Rd}$	110	98	102

- Dans cet exemple, les aciers au carbone et les aciers inoxydables possèdent une résistance au déversement très proche.
- Toutefois, les essais actuels et la littérature démontrent que ces valeurs devraient être modifiées pour être plus proches de la réalité → Elles sont trop conservatives.

Partie 4

Méthodes alternatives

Méthodes alternatives

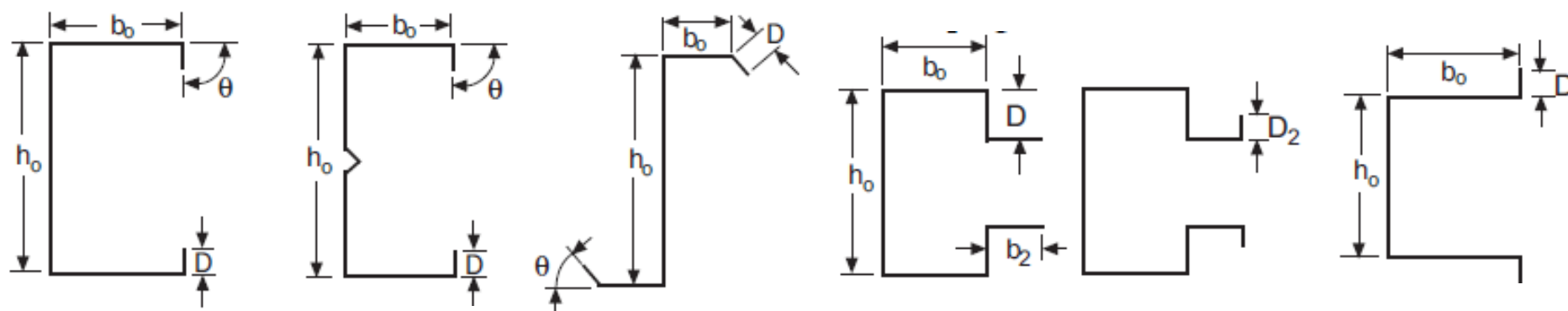
- Méthode de la « résistance directe » (DSM*)
 - Issue de la norme américaine
 - Utilisable pour les profils à parois minces
- Méthode de la « résistance continue » (CSM**)
 - Prend en compte les effets bénéfiques de l'écrouissage
- Méthode des éléments finis

*De l'anglais : « Direct Strength Method »

**De l'anglais « Continuous Strength Method »

Méthode de la « résistance directe »

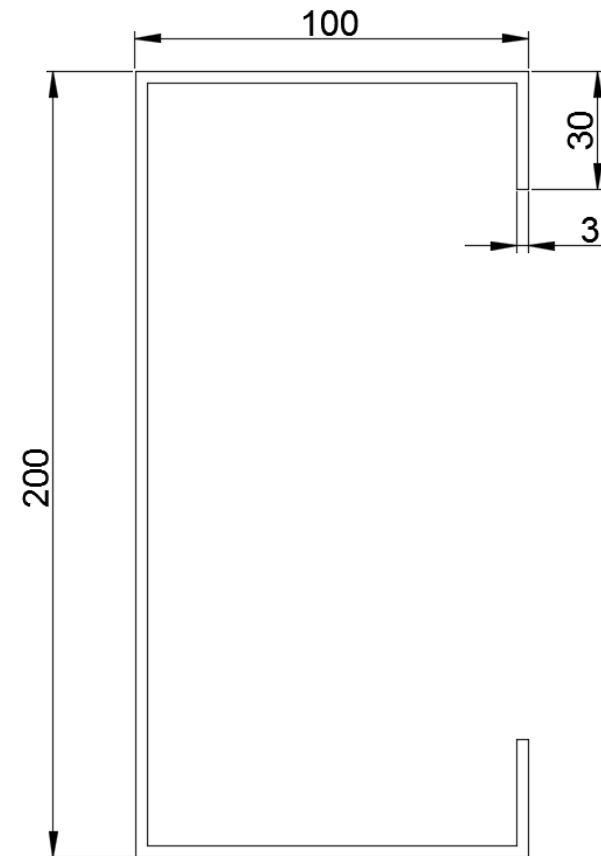
- Annexe 1 de l'AISI
- Méthode très simple et directe
- Utilisée pour les sections à parois minces



- Mais elle exige une « analyse au flambement élastique »
 - Méthode théorique issue de la littérature
 - Méthode des bandes finies (par exemple CUFSM)
- Pour plus d'informations : <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/>

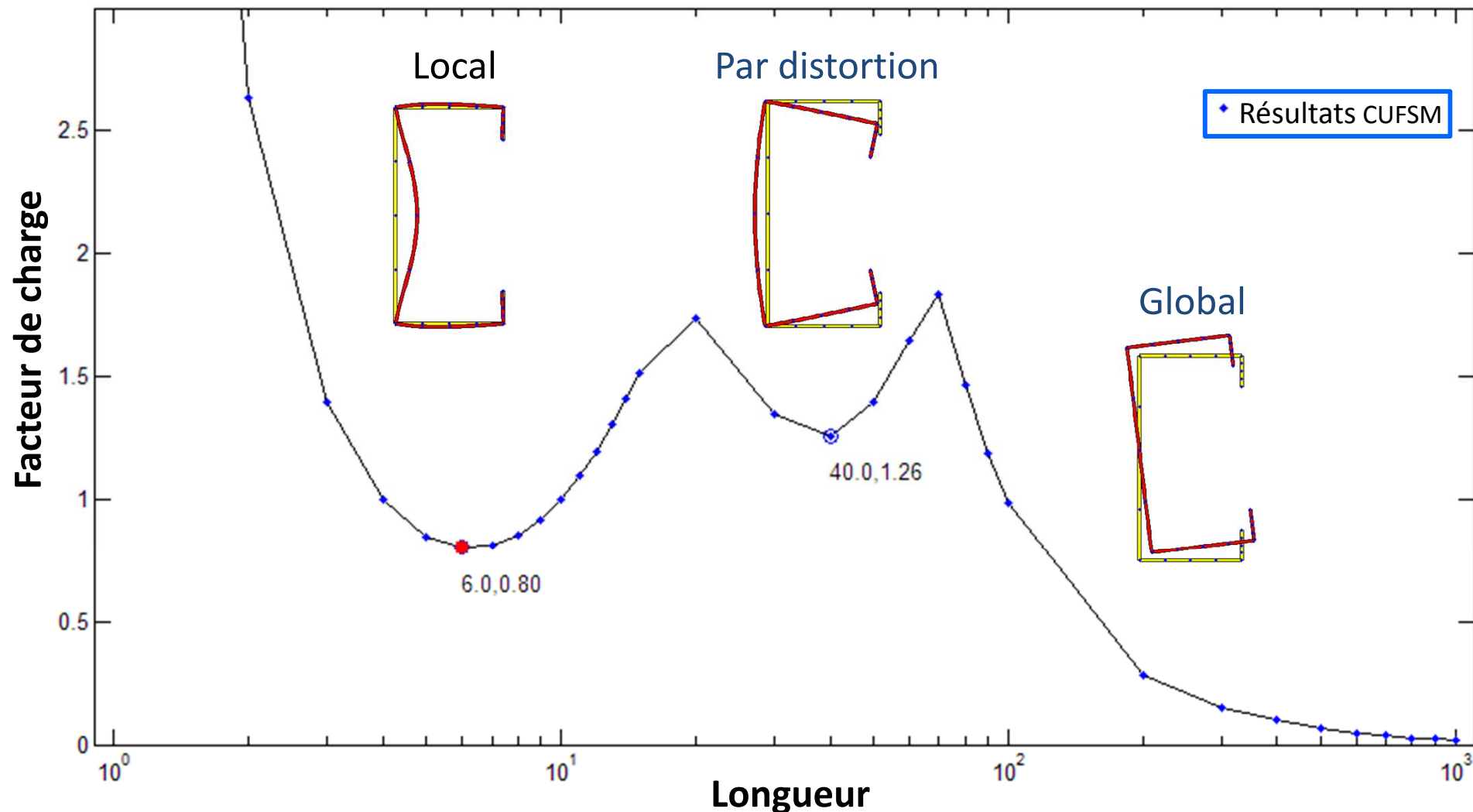
Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Section en C à bords raidis sous un effort de compression
- Acier inoxydable ferritique
 - Longueur du poteau :
 - EN 1.4003
 - $f_y = 280 \text{ MPa}$
 - $f_u = 450 \text{ MPa}$
 - $E = 220 \text{ GPa}$



Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Première étape : analyse au flambement élastique



Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Résultat de l'analyse = Charge de flambement élastique
 - Dans cet exemple, les facteurs de charge pour le flambement élastique sont les suivants :
 - Flambement local : 0,80
 - Flambement par distorsion : 1,26
 - Flambement global : 0,28
- Deuxième étape : Calcul des résistances nominales pour le :
 - Flambement local \Rightarrow une équation
 - Flambement par distorsion \Rightarrow une équation
 - Flambement global \Rightarrow une équation

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

■ Résistance nominale au flambement global P_{ne}

- $\lambda_c = \sqrt{P_y / P_{cre}} = 1,88$
- $P_y = A f_y = 376 \text{ kN}$
- $P_{cre} = 0,28 \times 376 = 107 \text{ kN}$

$$\text{Pour } \lambda_c \leq 1,5 \quad P_{ne} = (0,658^{\lambda_c^2}) P_y$$

$$\text{Pour } \lambda_c > 1,5 \quad P_{ne} = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2} \right) P_y$$

■ $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- **Résistance nominale au flambement global P_{nl}**

- $\lambda_l = \sqrt{P_{ne} / P_{crl}} = 0,56$

- $P_{crl} = 0,80 \times 376 = 302 \text{ kN}$

Pour $\lambda_l \leq 0,776$ $P_{nl} = P_{ne}$

Pour $\lambda_l > 0,776$
$$P_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{P_{crl}}{P_{ne}} \right)^{0,4} P_{ne}$$

- $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

■ Résistance nominale au flambement par distorsion P_{nd}

- $\lambda_d = \sqrt{P_y / P_{crd}} = 0,89$
- $P_{crd} = 1,26 \times 376 = 473 \text{ kN}$

$$\text{Pour } \lambda_d \leq 0,561 \quad P_{nd} = P_y$$

$$\text{Pour } \lambda_d > 0,561 \quad P_{nd} = \left[1 - 0,25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0,6} P_y$$

- $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$

Exemple de la méthode de la « résistance directe »

- Troisième étape : La résistance axiale P_n est « simplement » le minimum des résistances au flambement nominales
 - Local : $P_{nl} = 93,81 \text{ kN}$
 - Par distorsion : $P_{nd} = 344,56 \text{ kN}$
 - Global : $P_{ne} = 93,81 \text{ kN}$

$$\rightarrow P_n = 93,81 \text{ kN}$$

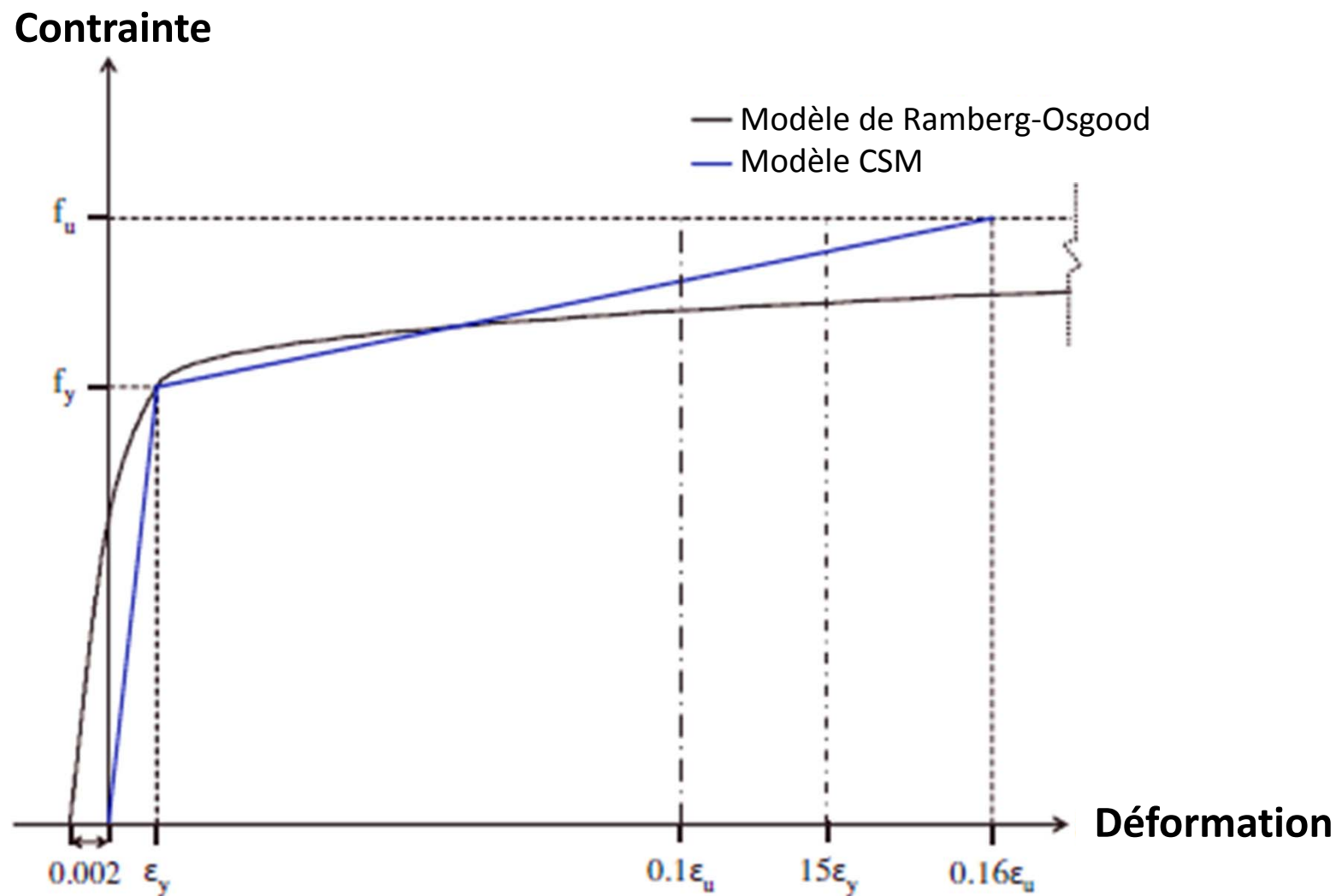
Méthode de la « résistance continue »

- Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable :
 - Comportement non-linéaire matériel
 - Avec écrouissage
 - Les méthodes de calcul conventionnelles ne sont pas capables de tenir compte du potentiel de plastification complète de la section

La méthode de la « résistance continue » utilise une loi de comportement qui tient compte de l'écrouissage

Méthode de la « résistance continue »

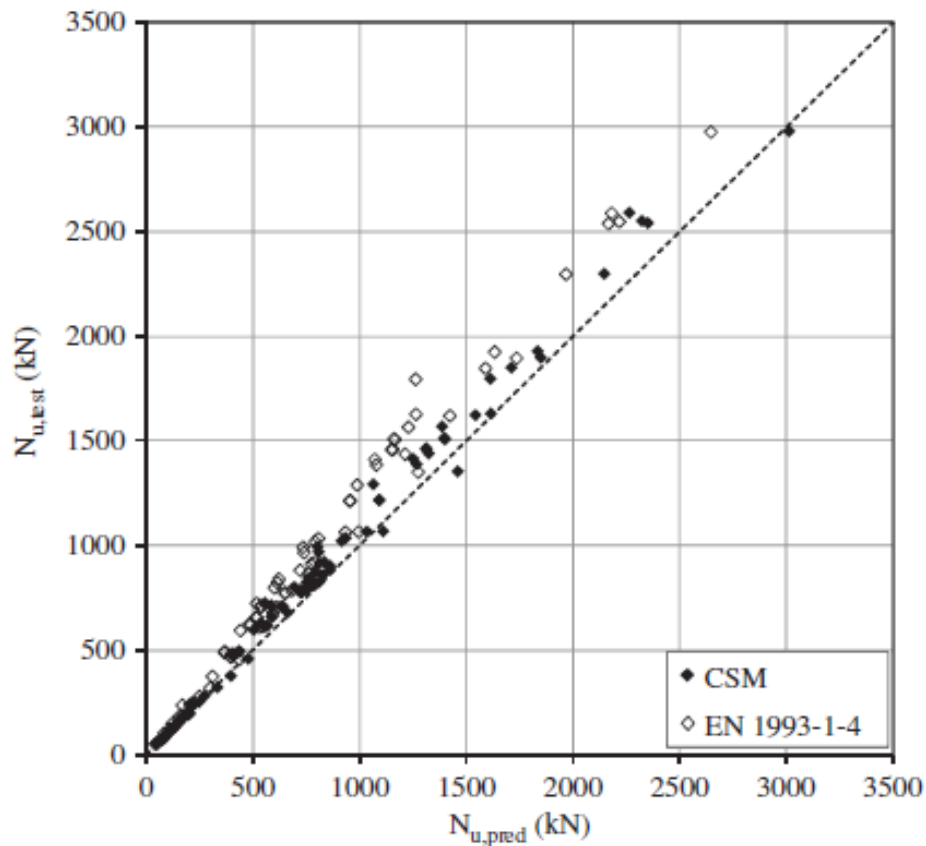
- Loi de comportement considérée dans la CSM :



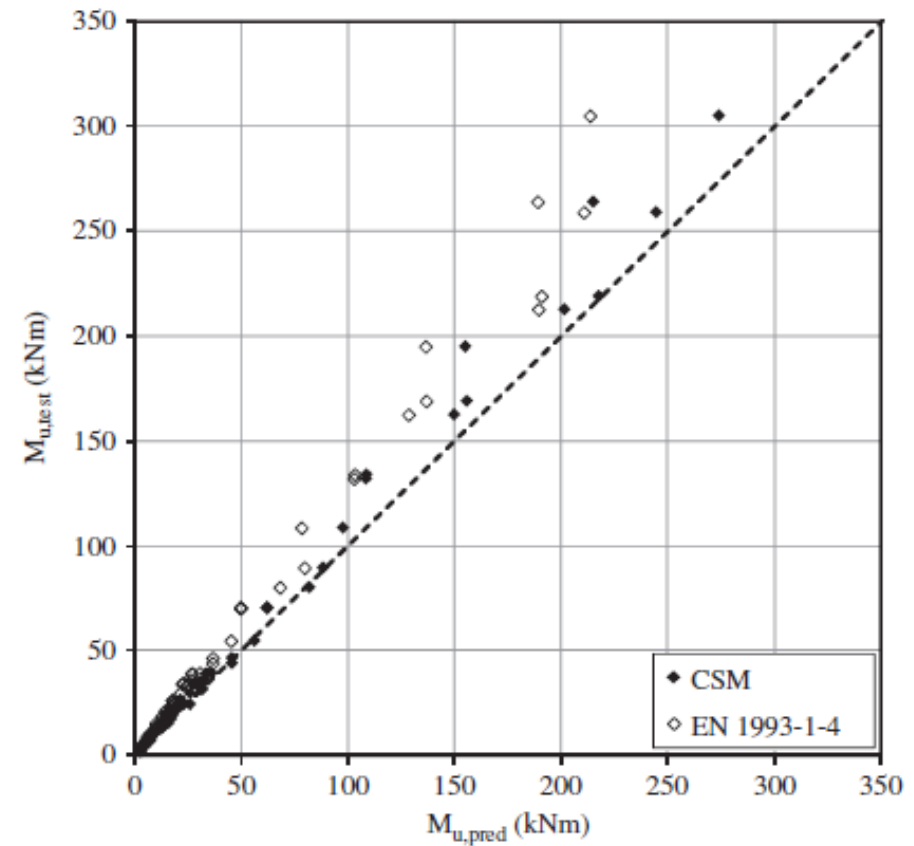
Méthode de la « résistance continue » ou CSM

Comparaison entre les résultats EC3 ou CSM avec des essais :

En compression



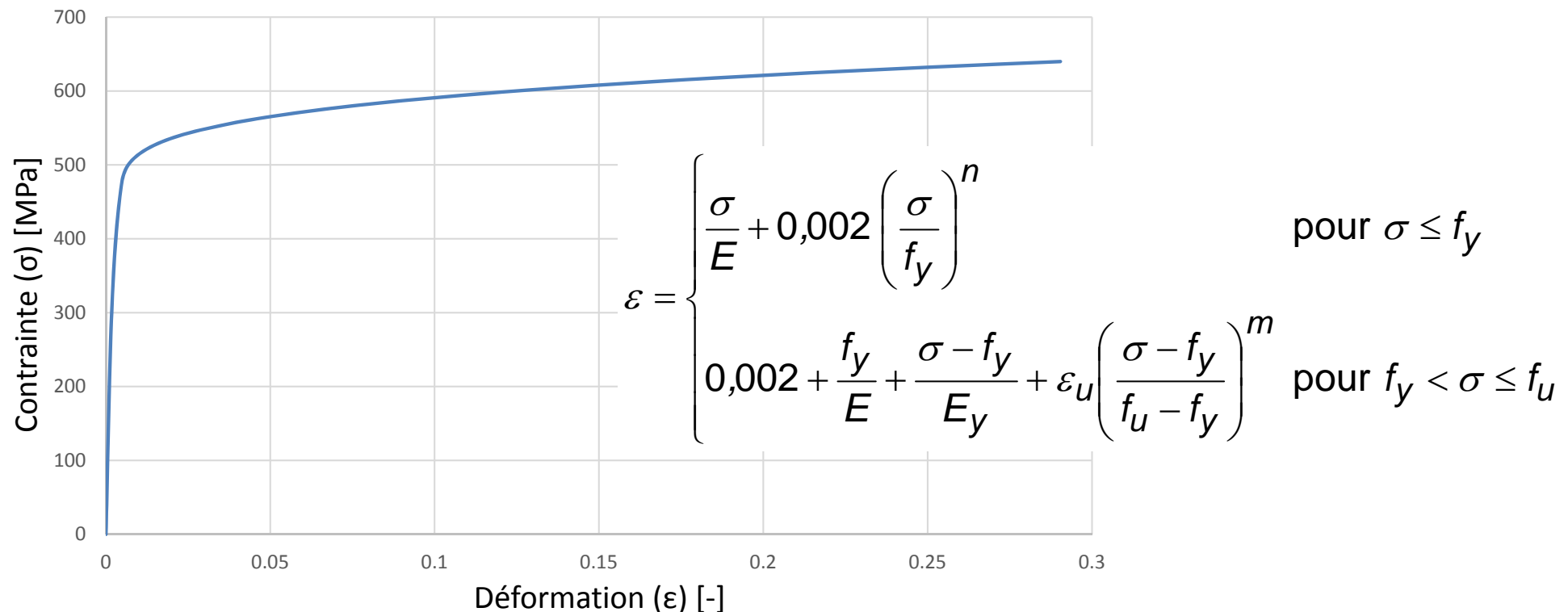
En flexion



La CSM est capable de refléter précisément le comportement des sections transversales

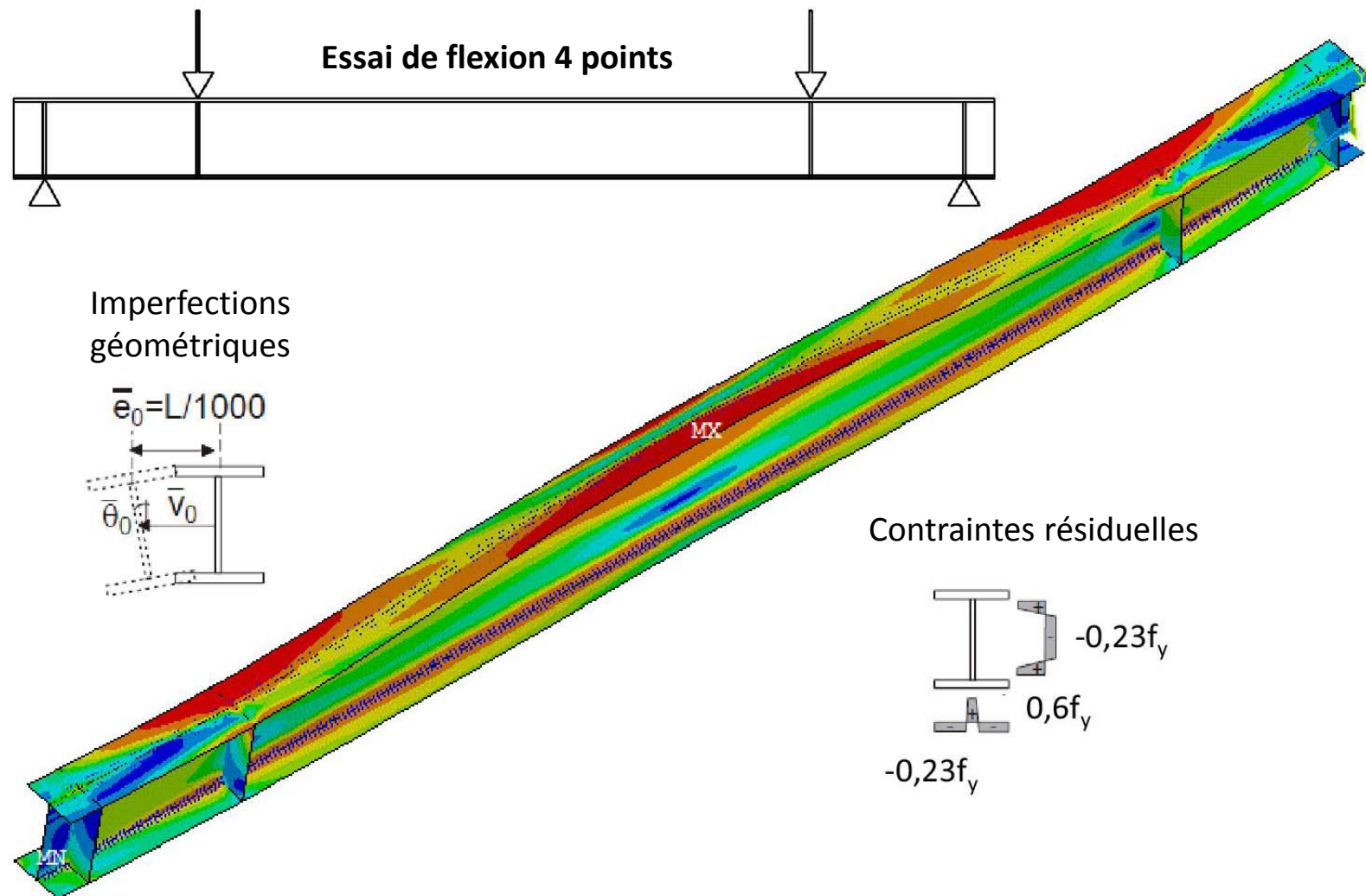
Méthodes des éléments finis

- La courbe contrainte-déformation du matériau peut être modélisée précisément (en utilisant par exemple la loi de Ramberg-Osgood ou des résultats de mesures « réelles » effectuées sur des éprouvettes de traction)



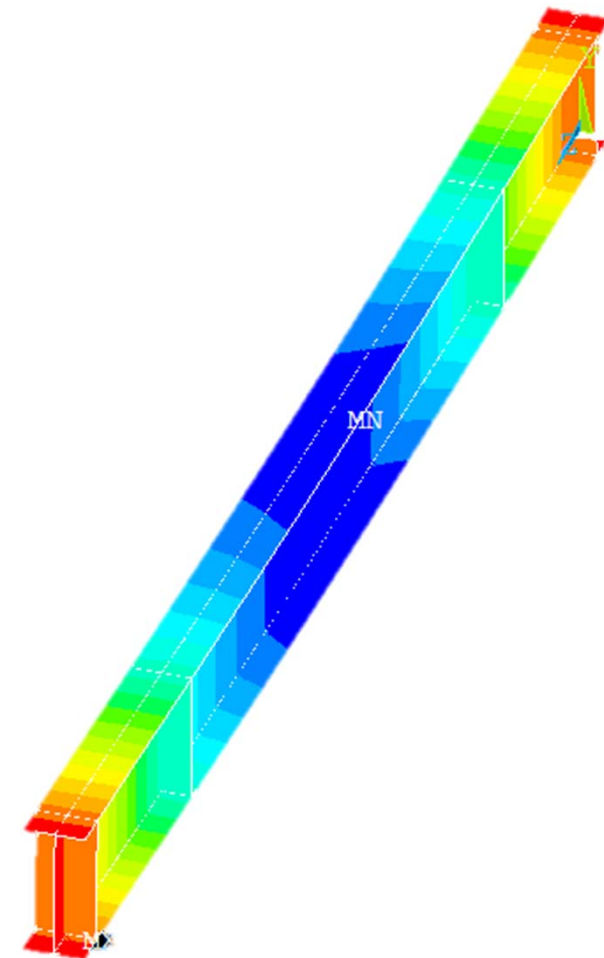
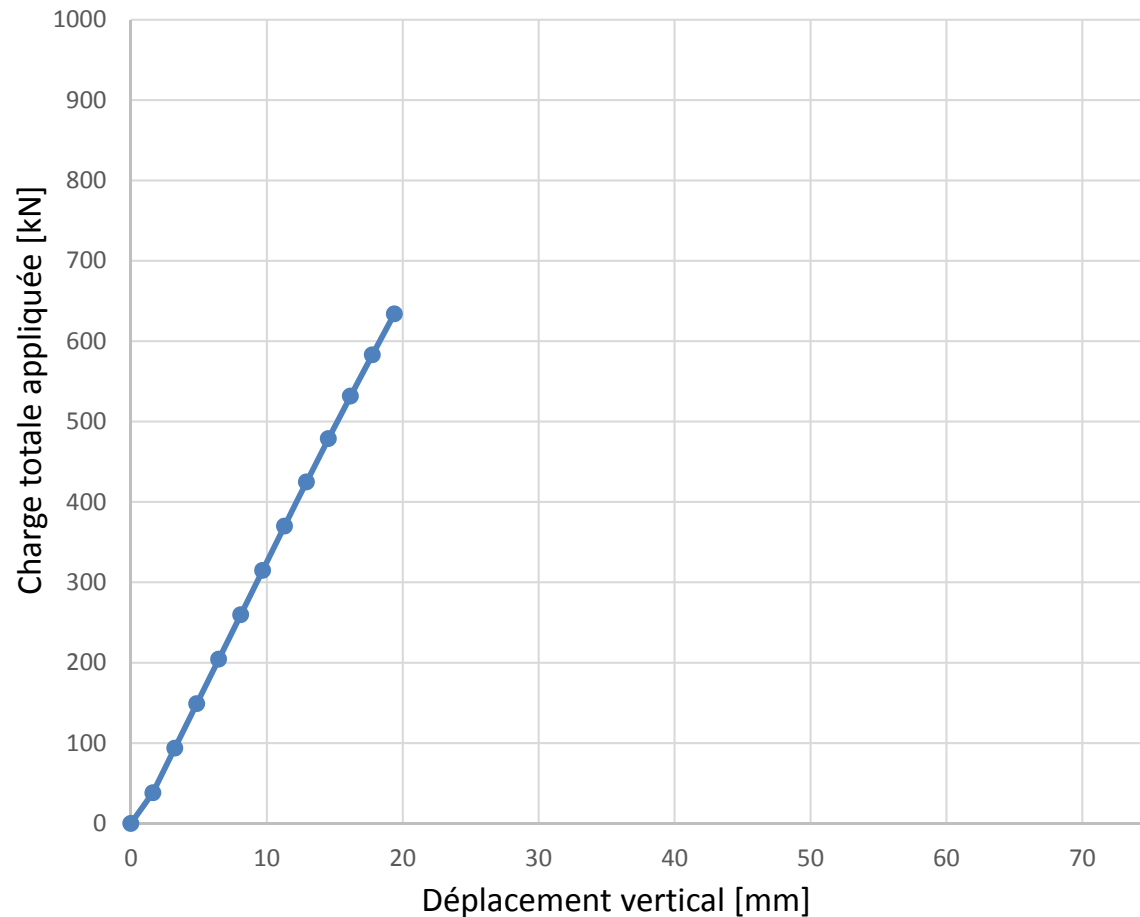
Méthode des éléments finis

- Poutre en I fléchie avec risque de déversement : toutes les imperfections peuvent être modélisées



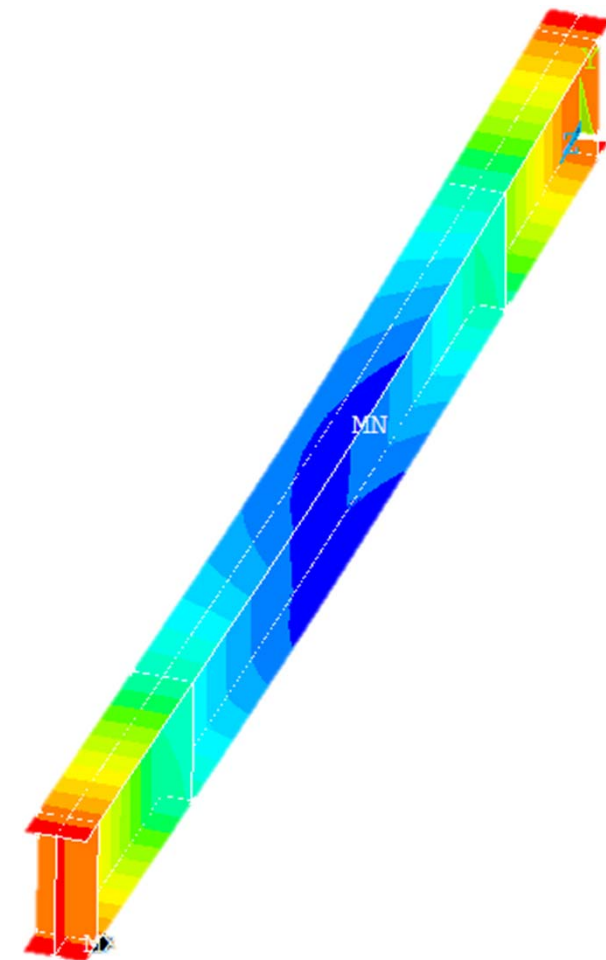
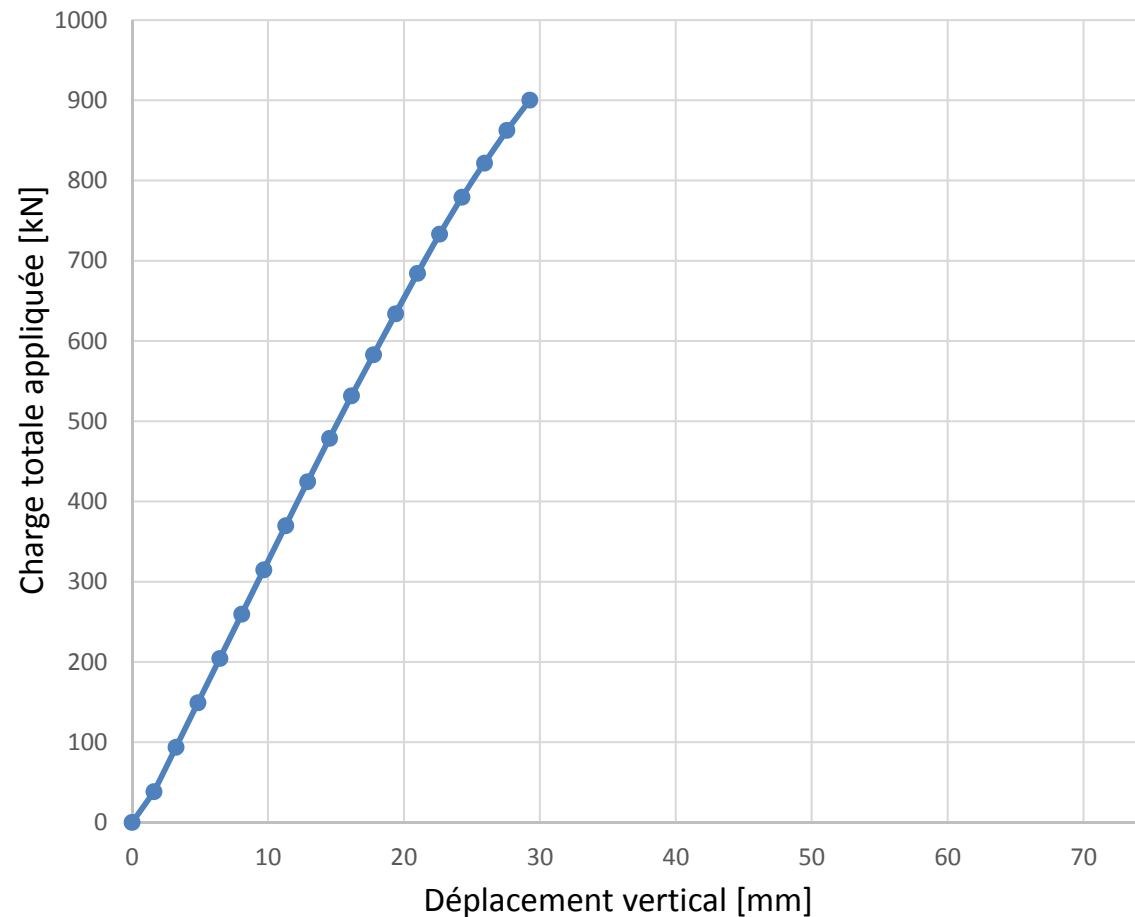
Méthode des éléments finis

- On peut calculer l'évolution de la flèche en fonction de la charge
 - Résultats : comportement élastique et première plastification



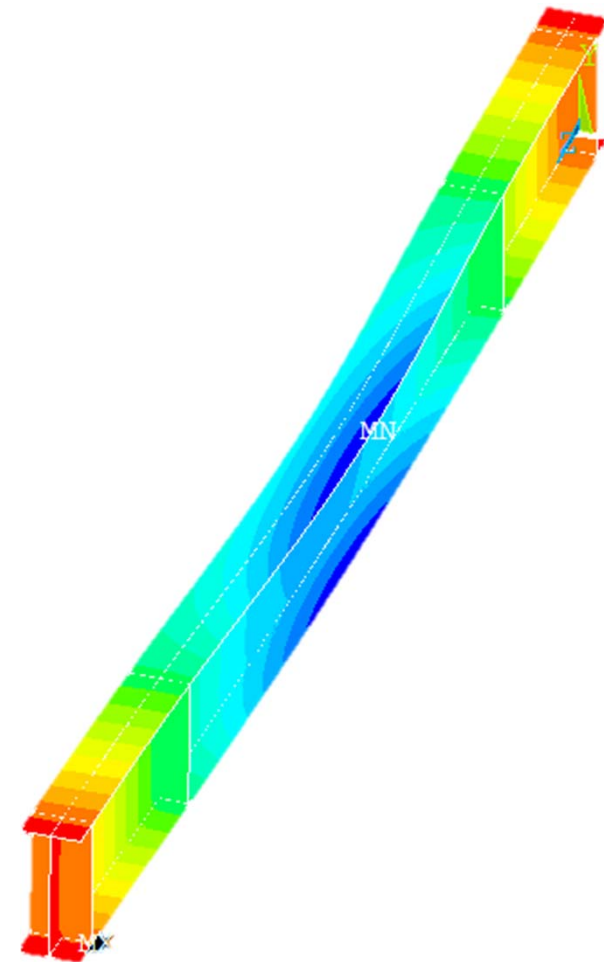
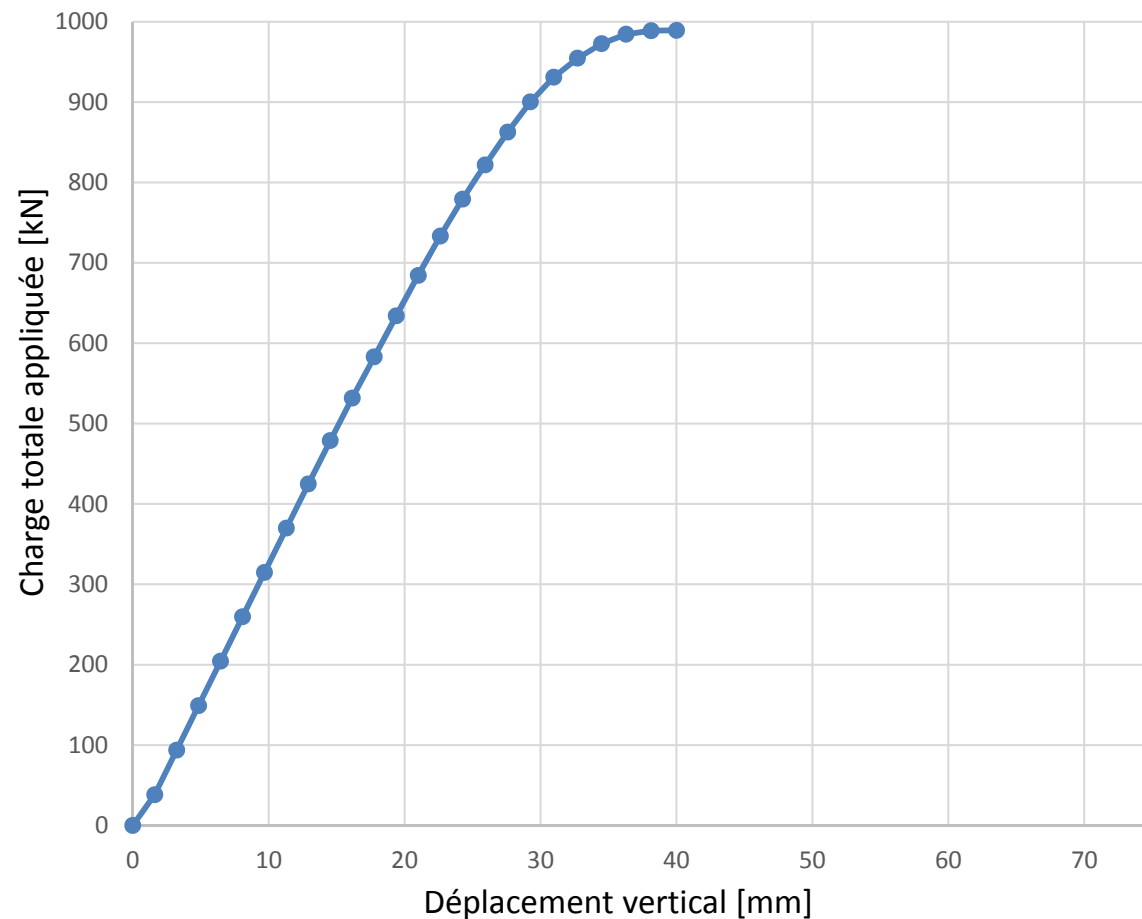
Méthode des éléments finis

- Résultats : phénomène d'instabilité → Début du déversement



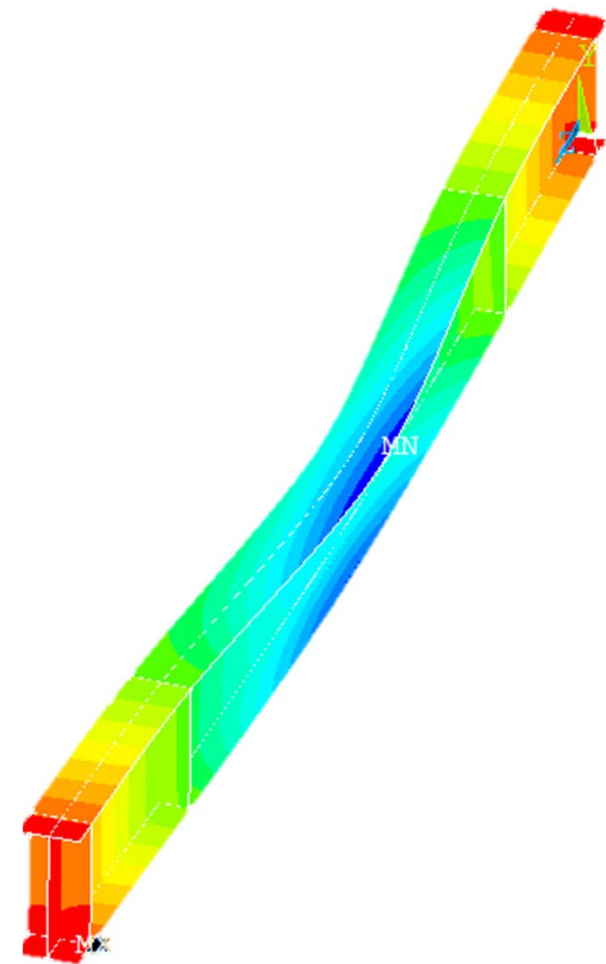
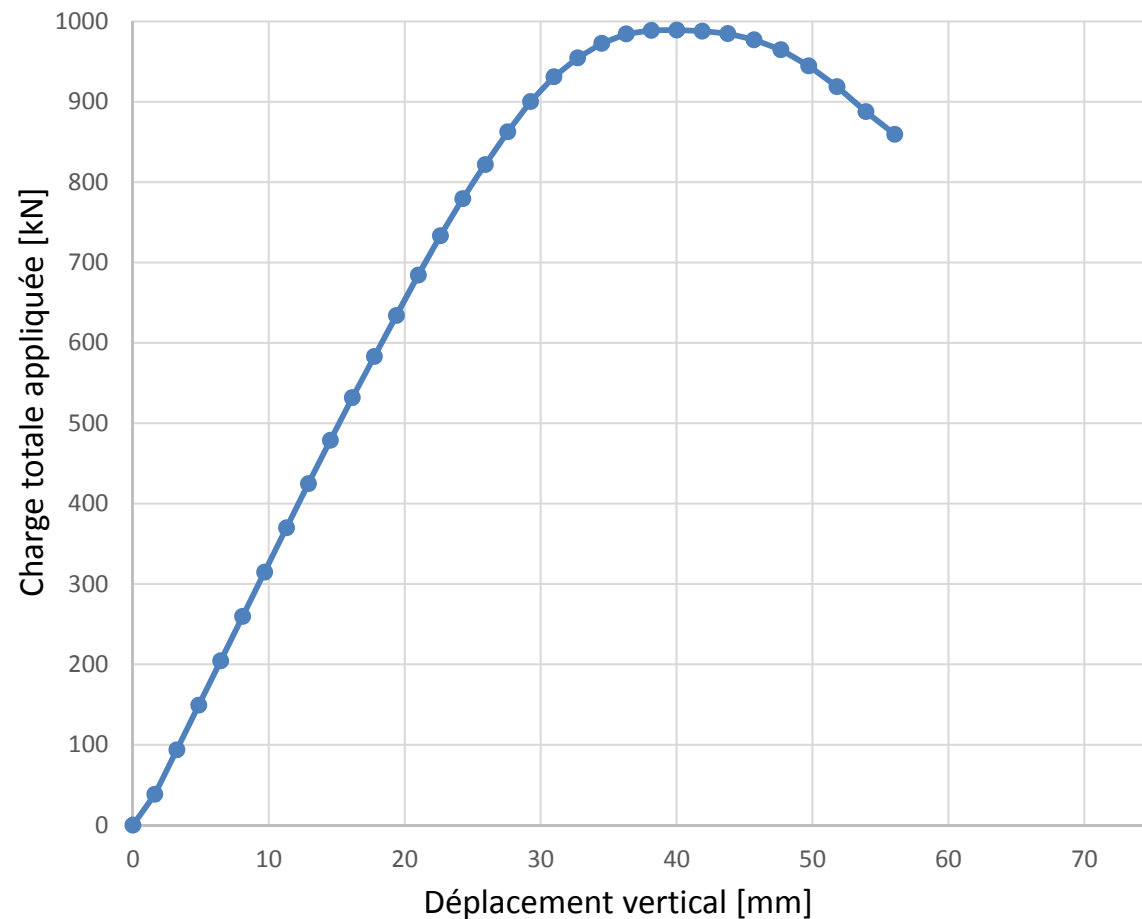
Méthode des éléments finis

- Résultats : phénomène d'instabilité → Le déversement se développe



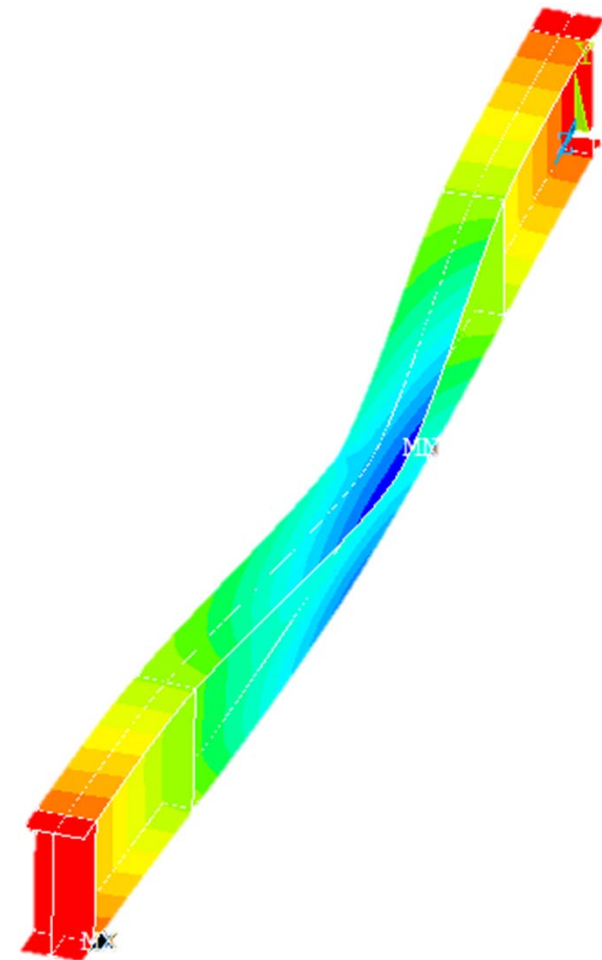
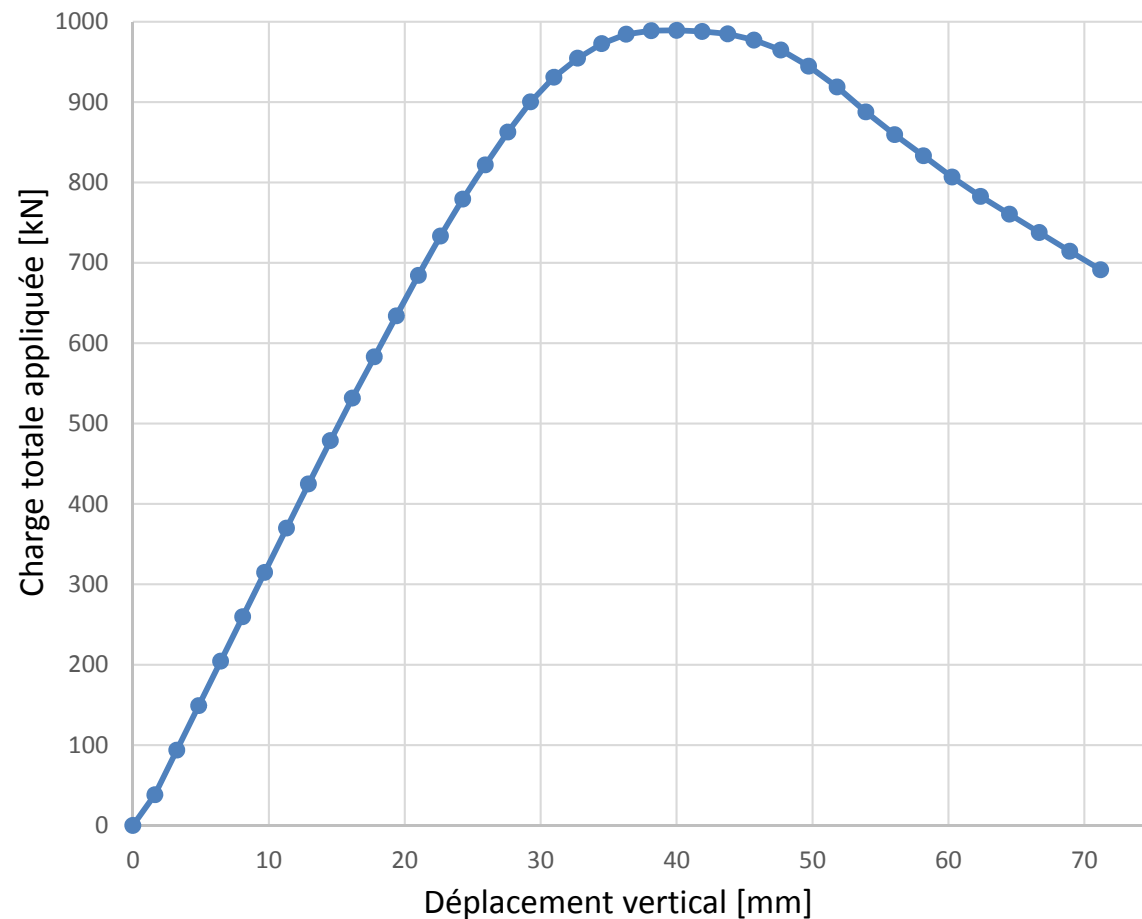
Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Méthode des éléments finis

— Résultats : Comportement post-instabilité



Partie 5

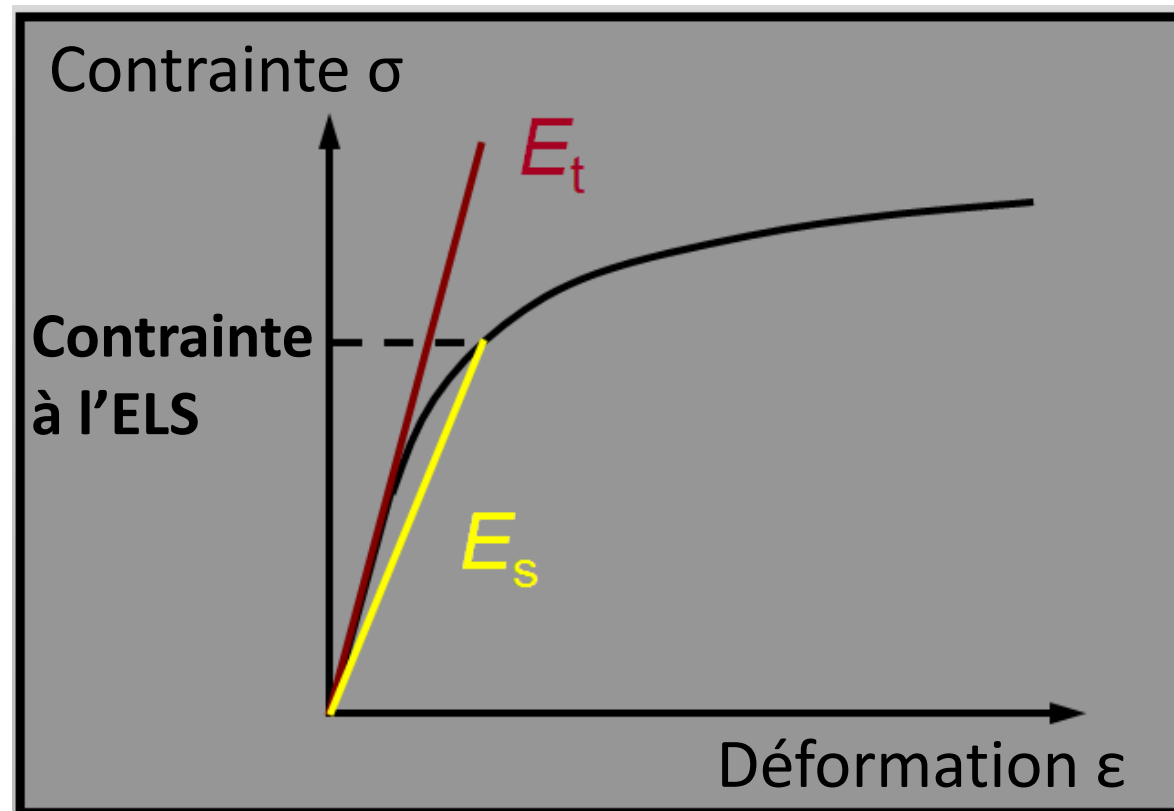
Flèches

Flèches

- La non-linéarité de la courbe contrainte-déformation implique que la rigidité de l'acier inoxydable \searrow lorsque les contraintes \nearrow
- Ainsi, les flèches sont légèrement plus importantes avec l'acier inoxydable qu'avec l'acier au carbone
- Pour être plus précis, il est préférable d'utiliser le module sécant correspondant à la contrainte à l'état limite de service (ELS)

Flèches

Module sécant E_s pour la contrainte à l'ELS dans l'élément



Flèches

Le module sécant E_s est calculé à partir du modèle de Ramberg-Osgood :

$$E_s = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{f} \left(\frac{f}{f_y} \right)^n}$$

f est la contrainte à l'état limite de service

n est une donnée du matériau

Flèches dans une poutre en acier inoxydable austénitique

Rapport de contraintes f / f_y	Module sécant E_s GPa	Augmentation de la flèche (en %)
0,25	200	0
0,5	192	4
0,7	158	27

f = contrainte à l'état limite de service (ELS)

Partie 6

Informations complémentaires

Réponse aux charges sismiques

- Une plus grande ductilité (inox austénitiques) permet de supporter un nombre de cycles de charge plus grand
→ plus grande dissipation hystérétique d'énergie sous chargement cyclique
- Une plus grande capacité d'écrouissage
→ facilite le développement de zones plastiques plus grandes & plus déformables
- Une plus grande dépendance du taux de déformation
→ plus grande résistance pour des déformations brusques

Calcul des assemblages boulonnés

- La résistance et le comportement face à la corrosion des boulons et des matériaux assemblés doivent être assez proches.
- Des boulons en acier inoxydable doivent être utilisés pour assembler des barres en inox afin d'éviter la corrosion galvanique
- Des boulons en acier inoxydable peuvent aussi être utilisés pour assembler des barres en acier galvanisées ou en aluminium

Calcul des assemblages boulonnés

- Les règles pour les jeux de boulons de l'acier au carbone peuvent généralement être appliquées à l'acier inoxydable (traction, cisaillement)
- Des règles spéciales sont nécessaires pour la résistance à la pression diamétrale afin de limiter la déformation due à la ductilité élevée de l'acier inoxydable

$$f_{u,red} = 0,5f_y + 0,6f_u < f_u$$

Boulons précontraints

Ils sont intéressants pour des structures comme les ponts, les pylônes, les mâts, etc., lorsque :

- les assemblages sont soumis à des vibrations,
 - il faut éviter un glissement entre les pièces assemblées
 - les charges appliquées sont alternées et varient fréquemment
-
- Il n'existe aucune règle de calcul pour les boulons précontraints en acier inoxydable
 - Des essais doivent être réalisés

Calcul des assemblages soudés

- Les règles de calcul de l'acier au carbone peuvent généralement être appliquées pour l'acier inoxydable
- Il faut utiliser les consommables qui conviennent avec la nuance d'acier inoxydable à souder
- Il est possible de souder ensemble de l'acier inoxydable avec de l'acier au carbone sous réserve de réaliser une préparation spéciale des pièces

Résistance à la fatigue

- Le comportement à la fatigue des assemblages soudés est dominé par la géométrie de la soudure
- La performance des aciers inoxydables austénitiques et duplex est au moins aussi bonne que celle de l'acier au carbone
- Il convient de suivre les spécifications de l'acier au carbone

Partie 7

Ressources pour ingénieurs

Ressources pour ingénieurs

- Centre d'information en ligne
- Étude de cas
- Guides de conception et de calcul
- Exemples de calcul
- Logiciels



100 YEARS OF STAINLESS STEEL

A CENTURY OF INNOVATION

From small beginnings a hundred years ago, stainless steel has grown to be an integral part of our lives. Utilised primarily for its corrosion resistance, stainless steel is also found in applications where strength, innovation and aesthetics are important.

[VIEW WEBSITE](#)



ONLINE INFORMATION CENTRE FOR STAINLESS STEEL IN CONSTRUCTION

[VIEW WEBSITE](#)



DESIGN MANUAL FOR STRUCTURAL STAINLESS STEEL

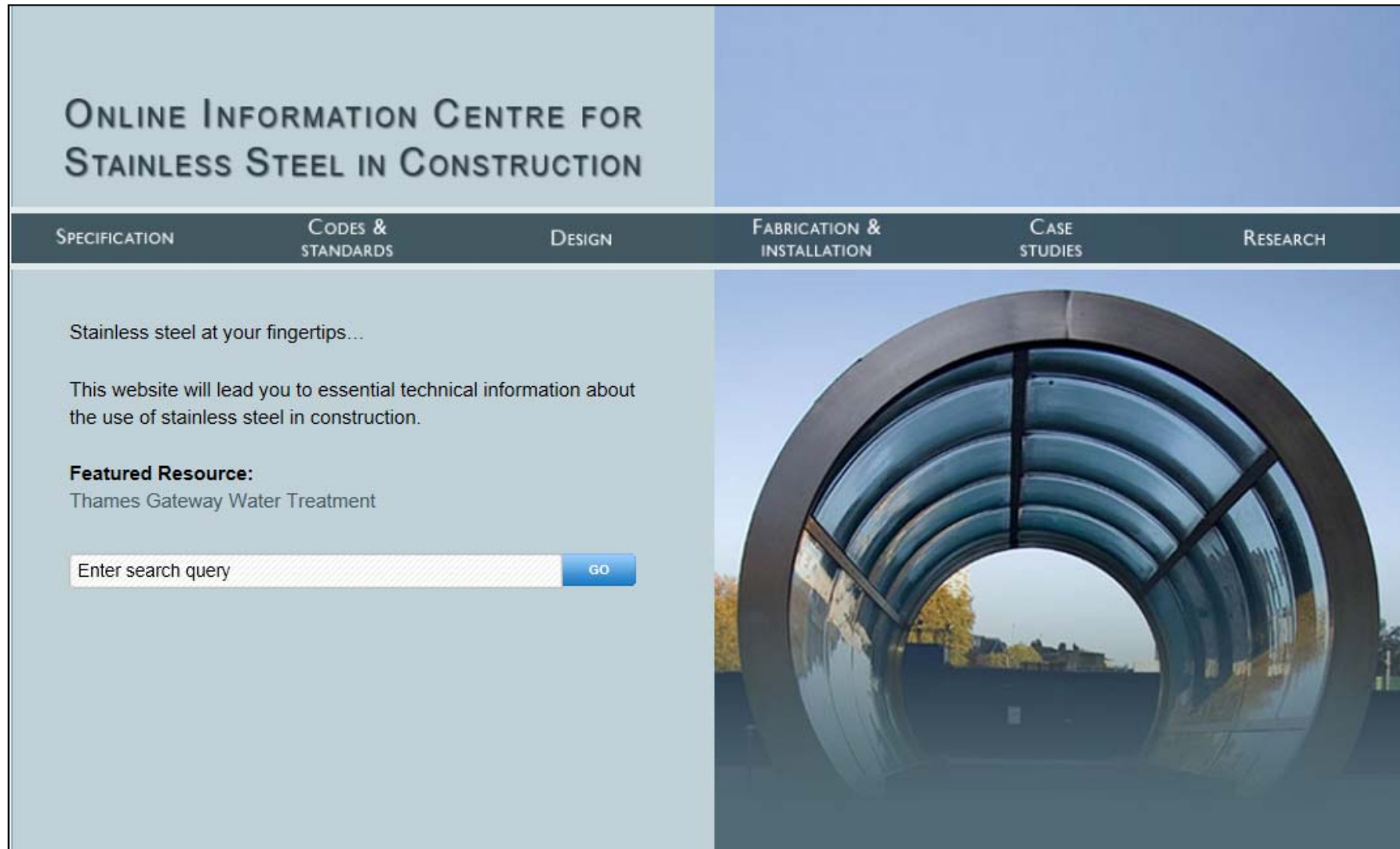
[VIEW PUBLICATION](#)



STRUCTURAL STAINLESS STEEL CASE STUDIES


[VIEW CASE STUDIES](#)

Centre d'information de l'acier inoxydable dans la construction : www.stainlessconstruction.com



12 études de cas de structures

www.steel-stainless.org/CaseStudies



Structural Stainless Steel Case Study 01

Stonecutters Bridge Towers

Stonecutters Bridge, Hong Kong, is a cable stayed structure with a total length of 1596 m and a main span of 1018 m. The bridge crosses the Rambler Channel and is the main entrance to the busy Kwai Chung Container Port. It is visible from many parts of Hong Kong Island and Kowloon. The most striking features of the bridge are the twin tapered mono towers at each end supporting the 50 m wide deck. These tapered towers rise to 295 m above sea level; the lower sections are reinforced concrete while the upper 115 m are composite sections with an outer stainless steel skin and a reinforced concrete core.

Material Selection




Figure 1: General view of Stonecutters Bridge

The design life of the bridge is 120 years. A highly durable material was required for the upper sections of the bridge towers because of the harsh marine and polluted environment. Additionally, post-construction maintenance on the towers will be extremely difficult, due to the live traffic beneath. Stainless steel was chosen for the skin of the composite section of the upper tower because of its durability and also its attractive appearance. Carbon steel would have required protective coatings that would have needed replacing after an estimated 25-30 years.

Standard molybdenum-alloyed austenitic steel grades were initially considered but discounted because of their relatively low design strength (220 N/mm²) and uncertainty regarding corrosion performance, given the roughness of the desired surface finish. Higher alloyed austenitics with better corrosion resistance, e.g. 1.4539 (N08904) and 1.4439 (S31726), were not considered in detail as they would not have met the requirements for cost, availability and strength. Duplex steel 1.4462 (S32205) was chosen as it has high strength (460 N/mm²) with good corrosion resistance and tolerance on surface finish.


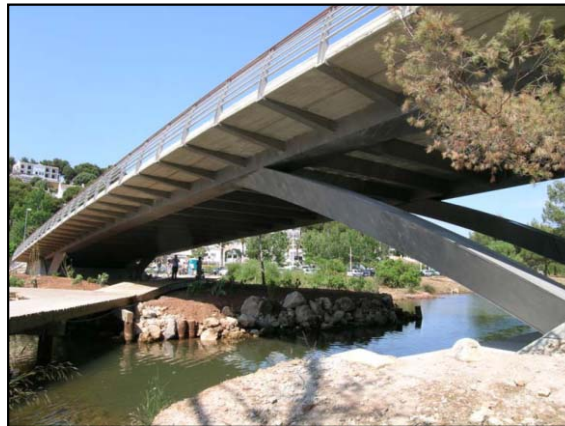


Figure 2: Mono tower and stay cables

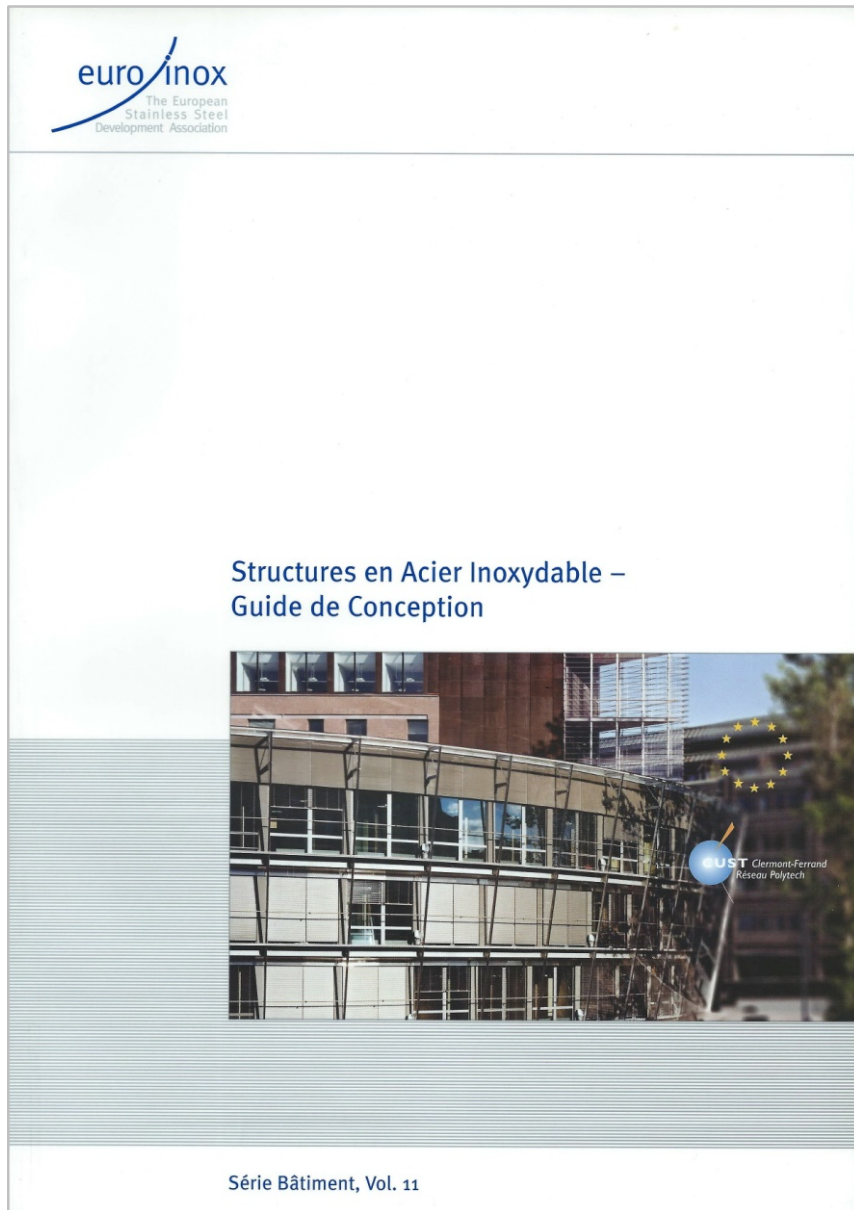
A polished 1K finish (as defined in EN 10088 Part 2 [1]) was specified for all exposed surfaces, with an average surface roughness R_a of 0.5 μ m. A slightly textured, non-directional, low reflective appearance was then created by shot peening the surface with a mixture of aluminium oxide and glass beads.

Structural Stainless Steel Case Study 01

Page 1



Guide de conception selon les Eurocodes



www.steel-stainless.org/designmanual

- Recommandations
- Commentaires
- Exemples de calcul

Logiciel de calcul en ligne :

www.steel-stainless.org/software

www.steel-stainless.org/software

Stainless Steel in Construction Design software for cold-formed stainless steel

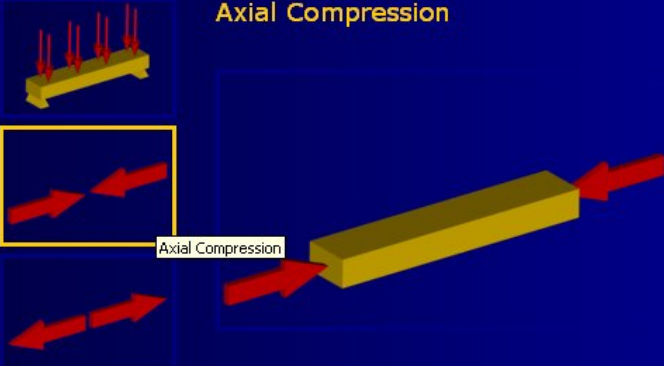
Home | Design Manual | Feedback | Help | About

Loading Mode | Section Geometry | Member Geometry | Material | Section Properties | Member Resistances | Summary

How is the member loaded? Select the type of loading by clicking on one of the loading buttons. The partial safety factors are from EN 1993-1-4. They can be modified by clicking in the relevant input box. Click on **proceed** to continue.

- Help
- Reset
- **Proceed...**

Axial Compression



Axial compression

Partial safety factors

γ_{M0}

γ_{M1} 1.1

γ_{M2}

Axial compression

A member is under a compression if it is braced or squashed by externally applied loads or temperature changes.

Click on this Loading button to apply "Axial Compression"

Copyright © 2002-2006, The Steel Construction Institute. All rights reserved.

Stainless Steel in Construction Design software for structural stainless steel

Home | Design Manual and Specifications | Feedback | Help | About

Loading Mode | Section Geometry | Member Geometry | Material | Section Properties | Member Resistances | Summary | Fire Resistances


Mode of Loading: Bending

Select a section: **User defined** **Standard sections**

Select hot rolled or laser welded section and then click on one of the section buttons. Click on **proceed** to continue.

- Help
- Reset
- **Proceed...**

Standard Sections

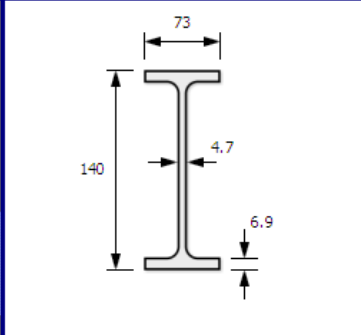


IPE 140

Available Sections:

- Montanstahl Stainless Steel Sections
 - IPE, European I beams, EN
 - IPE 80
 - IPE 100
 - IPE 120
 - **IPE 140**
 - IPE 160
 - IPE 180
 - IPE 200
 - IPE 220
 - IPE 240
 - IPE 270
 - IPE 300
 - IPE 330

Dimensions:



140

73

4.7

6.9

<http://www.montanstahl.com>

Cross-section images are shown for indicative purposes and do not reflect given proportions

Résumé

- Performances structurales de l'acier inoxydable :
Similaires à celles de l'acier au carbone mais quelques modifications sont nécessaires en raison de la non-linéarité de la loi contrainte-déformation
- Des règles de calcul ont été développées
- Des ressources (guides de calcul, études de cas, exemples rédigés, logiciels, etc.) sont disponibles gratuitement !

Références

- EN 1993-1-1. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. 2005
- EN 1993-1-4. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-4 : Règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables. 2006
- EN 1993-1-4. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier – Partie 1-4 : Règles générales - Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables. Modifications 2015
- AISI Standard. North American specification Appendix 1 : Design of Cold-Formed Steel Structural Members Using the Direct Strength Method. 2007
- B.W. Schafer. Review : The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research 64 (2008) 766-778
- S. Afshan, L. Gardner. The continuous strength method for structural stainless steel design. Thin-Walled Structures 68 (2013) 42-49

Merci !